

Lech Paszkowski, Andrzej Skalski, Dionizy Biało*

Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, Instytut Inżynierii Precyzyjnej i Biomedycznej, ul. św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa, Poland

* Corresponding author. E-mail: dbialo@mchtr.pw.edu.pl

Otrzymano (Received) 25.02.2008

WPŁYW BUDOWY KOMPOZYTÓW I WARUNKÓW WTRYSKIWANIA NA MAKSYMALNĄ GĘSTOŚĆ ENERGII MAGNETYCZNEJ $(BH)_{\max}$ DIELEKTROMAGNESÓW

Przedstawiono wpływ kształtu cząstek i ilości proszku o właściwościach magnetycznych w kompozytach termoplastycznych oraz parametrów ich wtryskiwania na maksymalną energię magnetyczną $(BH)_{\max}$. Fazę magnetyczną w postaci proszków Nd-Fe-B o płatkowym i kulistym kształcie ziaren równomiernie rozprowadzono w polimerowej osnowie. Przygotowano kompozyty o zawartościach proszku płatkowego od 40 do 54%, a dla proszku kulistego do 64%. Po zastosowaniu wyższych V_p niż podane kompozyty nie poddawały się wtryskiwaniu. Osnową kompozytów był wysokoudarowy polistyren. Wyniki badań przedstawiono w formie graficznej oraz w postaci zależności matematycznych maksymalnej energii magnetycznej od wielkości napełnienia kompozytów proszkami magnetycznymi. Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ kształtu cząstek i ilości proszku magnetycznego wprowadzonego do kompozytu na maksymalną gęstość energii magnetycznej. Nie stwierdzono znacznego wpływu parametrów wtryskiwania na wartość energii magnetycznej wytworzonych materiałów.

Słowa kluczowe: proszki magnetyczne, dielektromagnesy, wtryskiwanie, maksymalna gęstość energii magnetycznej

INFLUENCE OF THE STRUCTURE AND INJECTION MOULDING PARAMETERS ON THE MAXIMUM ENERGY PRODUCT $(BH)_{\max}$ OF THE DIELECTROMAGNETS

One of the production methods of dielectromagnets is injection moulding. This technology applied was in presented paper. Special moulded samples were prepared for analysis of maximum energy product, $(BH)_{\max}$. Samples with composite structure contained thermoplastic polymer and hardmagnetics powders. The flaky and spheroidal powder made from magnetic isotropic alloy Nd-Fe-B (Magnequench International USA) were used. As polymer matrix, the high impact polystyrene (DWORY S.A.) was used. Composites were made by the solvent method using toluene. Variable filling ratio of the flaky (40÷54%) and spheroidal (40÷64%) powder was used. Modernized injection moulding machine Arburg C4/b were apply to manufacture of samples. The temperature of feedstock during injection was 160, 200 and 240°C. The pressure of injection was 80, 110 and 140 MPa. The commercial flaky and spheroidal powders are shown. The influence of flaky and spheroidal powders content on maximum energy product of injection moulded dielectromagnets in constant temperature (200°C) and constant pressure (110 MPa) is shown. It was stated that the higher filling ratio (V_p) of the composites by the powder the higher $(BH)_{\max}$ and the better are dielectromagnets. For the same value of V_p , composites filled by flaky powder have higher $(BH)_{\max}$. It was caused by better properties of flaky powder. But using spheroidal powder higher filling content V_p is possible, so magnetic properties may be compare to properties reached at maximum V_p for flaky powder. The influence the filling ratio with both kind of powder used for preparing the feedstocks on $(BH)_{\max}$ of injection moulded dielectromagnets at constant pressure of 110 MPa and temperature of 160, 200 and 240°C were shown. The investigation results of influence the volume fraction of magnetic powder in composites with both kind of powder on $(BH)_{\max}$ injection in constant temperature of 200°C and pressure of 80, 110 and 140 MPa were presented. The analysis of the received results showed, that the significant influence on the $(BH)_{\max}$ had the kind of the powder used for prepared samples. The influence of the injection moulding parameters on $(BH)_{\max}$ received dielectromagnets are limited.

Keywords: dielectromagnets, magnetic powder, injection moulding, maximum energy product

WPROWADZENIE

Nowoczesne stopy magnetyczne zawierają w swoich składach metale ziem rzadkich. Są one trudne w formowaniu z nich odpowiednich kształtek, gdyż są twarde i kruche. Wykazują ponadto duże powinowactwo do tlenu. Dlatego metody obróbki wiórowej, kucie

czy odlewania nie mogą być powszechnie stosowane do wytwarzania odpowiednich kształtek.

Do wytwarzania magnesów z tych nowoczesnych stopów wykorzystuje się metalurgię proszków. Matrycowe prasowanie proszków nie zawsze przynosi zado-

walające efekty, szczególnie przy konieczności formowania wyrobów o dużej smukłości oraz wyrobów o cienkich ściankach. Wypraski wymagają spiekania w wysokich temperaturach, w trakcie którego dochodzi do nadmiernego rozrostu ziaren. Zjawisko to zmniejsza wartości wielkości magnetycznych wyrobów. Ze względu na silne powinowactwo składników stopowych do tlenu proces spiekania prowadzony jest w atmosferach ochronnych. Metoda ta jest kosztowna, ale mimo tego jest stosowana do wytwarzania magnesów o najwyższych, możliwych do uzyskania, właściwościach magnetycznych [1].

W wielu powszechnych zastosowaniach magnesów nie wymaga się najwyższych właściwości magnetycznych, a istotne jest wyraźne obniżenie kosztów produkcyjnych. Procesów wysokotemperaturowego spiekania można uniknąć przez zastosowanie na magnesy innych materiałów, np. materiałów kompozytowych, w których cząstki magnetycznego proszku są wiązane innym materiałem. W tym celu stosuje się szkła i metale niskotopliwe oraz polimery. Pozytywne rezultaty przynosi, na przykład, stosowanie niewielkich ilości wynoszących wagowo 2÷3% (objętościowo do 20%) polimerów termoutwardzalnych [2]. Kompozyty takie formuje się w odpowiednie wyroby metodą prasowania matrycowego, a otrzymane kształtki wygrzewa w podwyższonej temperaturze. W takim procesie zastosowanie Epidianu EP 100 jako materiału wiążącego wymaga wygrzewania kształtek w temperaturze nieprzekraczającej 200°C. Pozostają jednak niedogodności wynikające z ograniczeń, dotyczących kształtów wyrobów wytwarzanych metodami prasowania matrycowego.

Materiałem wiążącym może być termoplastyczny polimer [2-5]. W tym przypadku wytwarza się granulaty składający się z obu składników, a kształtki otrzymuje się przez wtryskiwanie uplastycznionego kompozytu do formy wtryskowej. Zaletą wtryskiwania jest możliwość otrzymania gotowych elementów o wymaganych kształtach w jednym krótkim cyklu. Konieczne jest tylko ich namagnesowanie.

Prezentowana praca dotyczy procesu formowania wtryskowego kształtek złożonych z magnetycznego proszku stopowego Nd-Fe-B i polistyrenu jako materiału wiążącego.

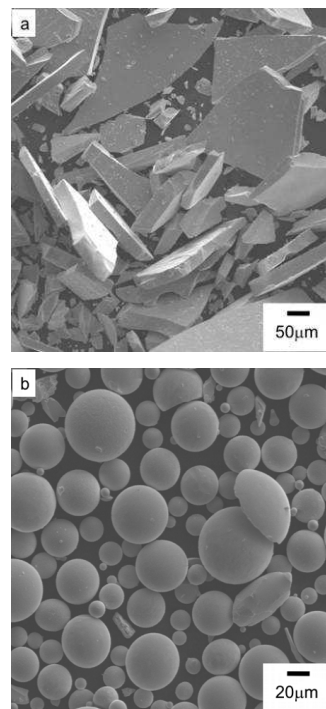
PRZYGOTOWANIE PRÓBEK DO BADAŃ MAGNETYCZNYCH

Do badań zastosowano proszki magnetyczne wytwarzane ze stopów Nd-Fe-B przez firmę Magnequench International [6]. Zastosowano proszki o płatkowym i kulistym kształcie ziaren (rys. 1).

Proszek płatkowy wytwarzany jest przez mielenie szybko studzonej taśmy powstałej w trakcie natryskiwania ciekłego stopu na obracający się, chłodzony bęben. Proszek kulisty wytwarzany jest metodą rozpylania

strugi ciekłego stopu w gazie obojętnym. W obu metodach wytwarzane są proszki o zróżnicowanej wielkości cząstek. Wielkość ziaren proszku płatkowego dochodzi do 250 μm , a proszku kulistego nie przekracza 100 μm . W niewielkim stopniu są także zróżnicowane właściwości magnetyczne materiału na proszki, np. wartość maksymalnej energii magnetycznej wynosi [6]:

- dla proszku płatkowego: $(BH)_{\max} = 111 \div 126 \text{ kJ/m}^3$,
- dla proszku kulistego: $(BH)_{\max} = 80 \div 92 \text{ kJ/m}^3$.



Rys. 1. Obraz proszku płatkowego (a) i proszku kulistego (b)

Fig. 1. View of the powders: flaky (a) and spheroidal (b) powder

Materiałem osnowy kompozytów magnetycznych był wysokoudarowy polistyren firmy DWORY S.A. [7].

Granulaty do wtryskiwania przygotowano metodą rozpuszczalnikową z zastosowaniem toluenu. Proszek magnetyczny wprowadzono do roztworu polistyrenu w toluenie i dokładnie mieszano aż do uzyskania jednolitej masy, o konsystencji bardzo gęstej cieczy. Masę tę wykładano na płaską powierzchnię, gdzie po odparowaniu toluenu powstawała elastyczna płytka, którą mechanicznie granulowano.

Przygotowano granulaty z obu rodzajów proszków, stosując następujące wielkości napełnienia kompozytów:

- dla proszku płatkowego: $V_p = 40, 44, 48, 52$ i 54% obj.,
- dla proszku kulistego: $V_p = 40, 48, 54, 60$ i 64% obj.

Największe wartości napełnienia kompozytów dla obu rodzajów proszków magnetycznych stanowią wartości maksymalne, gdyż kompozyty o większym napełnieniu nie poddają się już wtryskiwaniu. Nie stosowano również napełnień mniejszych niż 40% obj., gdyż takie

dielektromagnesy cechują się zbyt niskimi wartościami wielkości magnetycznych [4].

Proces wtryskiwania prowadzono na zmodernizowanej pionowej wtryskarce firmy Arburg C4/b. Formę do wtryskiwania zaprojektowano w sposób pozwalający wytwarzać próbki w kształcie walca o średnicy $\Phi = 10$ mm i wysokości $h = 4$ mm. Wielkość wytwarzanych próbek była uwarunkowana wymogami stanowiska magnesującego i pomiarowego wielkości magnetycznych.

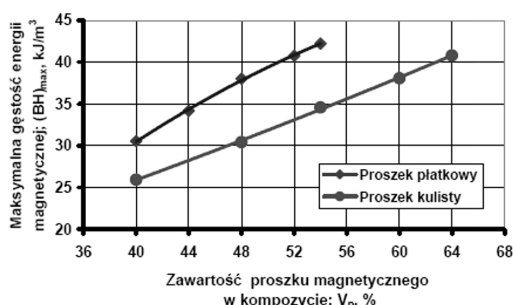
Kompozyty wtryskiwano przy skrajnych wartościach parametrów przetwórczych zalecanych przez producenta polimeru oraz przy wartościach średnich w stosunku do wartości skrajnych. Tak więc wtryskiwanie prowadzono przy:

- temperaturze wtryskiwania: $T_w = 160, 200$ i 240°C ,
- ciśnieniu wtryskiwania: $p_w = 80, 110$ i 140 MPa.

Przygotowane próbki poddano badaniom, w których skoncentrowano się na określaniu maksymalnej gęstości energii magnetycznej $(BH)_{\max}$.

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

Otrzymane wyniki badań wpływu wielkości napełnienia kompozytów dwoma rodzajami proszków magnetycznych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wpływ zawartości proszku płatkowego i kulistego w kompozytach na maksymalną gęstość energii magnetycznej $(BH)_{\max}$ próbek. Parametry wtryskiwania: $T_w = 200^\circ\text{C}$, $p_w = 110$ MPa

Fig. 2. Influence of the filling ratio of the composites by the flaky and spheroidal powder on $(BH)_{\max}$ samples injected at temperature 200°C and pressure 110 MPa

Analiza przebiegu przedstawionych zależności pozwala stwierdzić, że, zgodnie z przewidywaniami, maksymalna wartość energii magnetycznej kształtek zależna jest od ilości proszku magnetycznego zawartego w poszczególnych kompozytach i jest ona tym większa, im więcej jest proszku w kompozycie. Wyższe wartości maksymalnej energii magnetycznej mają kształtki z proszkiem płatkowym. Jest to zależność prawidłowa, wynikająca z wartości $(BH)_{\max}$, podanych przez producenta obu rodzajów proszków magnetycznych. Dla maksymalnego napełnienia kompozytów (proszkiem płatkowym $V_p = 54\%$ oraz proszkiem kulistym $V_p = 64\%$) wartości maksymalnej energii magnetycznej są niższe dla próbek zawierających proszek kulisty.

Wzrost wartości energii magnetycznej kształtek zawierających proszek płatkowy w całym zakresie wielkości napełnienia kompozytów wynosi ok. 38%, osiągając przy największym napełnieniu wartość $42,23$ kJ/m³. Stanowi to prawie 36% wartości $(BH)_{\max}$ podanej przez producenta proszku magnetycznego. Dla kształtek z proszkiem kulistym maksymalna wartość energii magnetycznej wynosi $40,81$ kJ/m³, co daje wzrost o ponad 57% w stosunku do kształtek o najmniejszej wielkości napełnienia. Osiągnięta najwyższa wartość energii magnetycznej kształtek z proszkiem kulistym stanowi ponad 47% wartości $(BH)_{\max}$ podanej przez producenta proszku.

Zależność maksymalnej energii magnetycznej próbek od wielkości napełnienia kompozytu proszkiem płatkowym można przedstawić w następującej postaci:

$$(BH)_{\max} = -0,0187(V_p)^2 + 2,5547(V_p) - 39,179$$

Wartość korelacji liniowej Pearsona wynosi 0,9992, co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu modelu matematycznego do otrzymanych wartości pomiarowych.

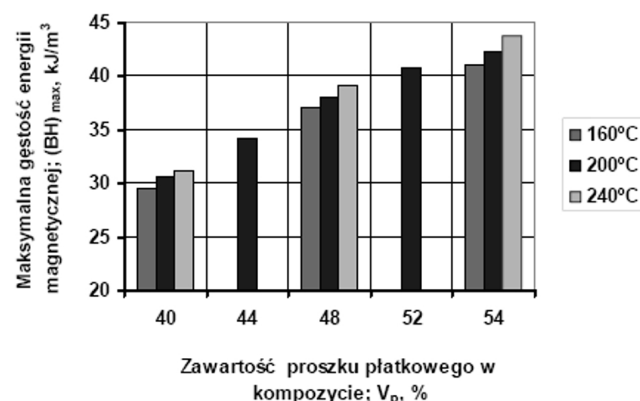
Dla kształtek zawierających proszek kulisty zależność przedstawia się następująco:

$$(BH)_{\max} = 0,0018(V_p)^2 + 0,4319(V_p) + 5,703$$

a wskaźnik korelacji ma wartość 0,9992.

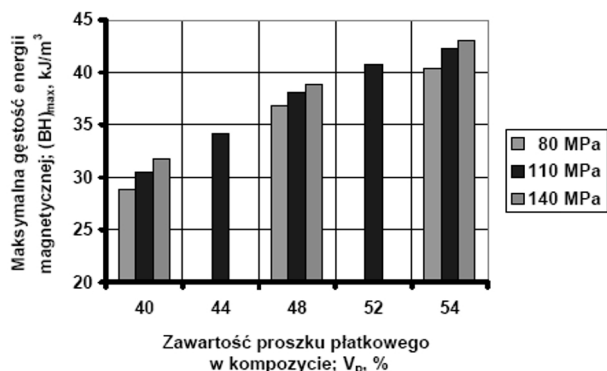
Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wpływ wielkości napełnienia kompozytów proszkiem płatkowym na wartość energii magnetycznej kompozytów wtryskiwanych w temperaturze: 160, 200, 240°C pod stałym ciśnieniem wynoszącym 110 MPa oraz kompozytów wtryskiwanych przy ciśnieniu: 80, 110 lub 140 MPa i temperaturze 200°C .

Na rysunkach 5 i 6 przedstawione zostały podobne zależności, ale dla kompozytów zawierających proszki kuliste.



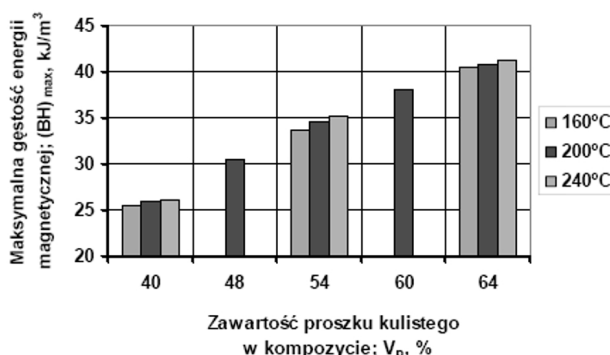
Rys. 3. Wpływ wielkości napełnienia kompozytów proszkiem płatkowym na maksymalną gęstość energii magnetycznej $(BH)_{\max}$ dla próbek otrzymanych przy ciśnieniu 110 MPa w zmiennej temperaturze wtryskiwania

Fig. 3. Influence of the filling ratio of the composite by the flaky powder on $(BH)_{\max}$ samples injected at constant pressure (110 MPa) and variable temperature



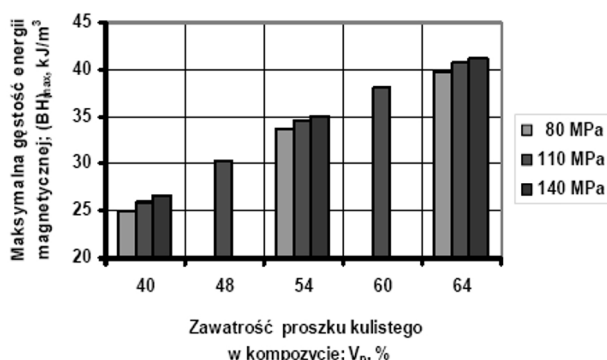
Rys. 4. Wpływ wielkości napełnienia kompozytów proszkiem płatkowym na maksymalną gęstość energii magnetycznej $(BH)_{max}$ dla próbek otrzymanych przy temperaturze 200°C i zmiennym ciśnieniu wtryskiwania

Fig. 4. Influence of the filling ratio of the composite by the flaky powder on $(BH)_{max}$ samples injected at constant temperature (200°C) and variable pressure



Rys. 5. Wpływ wielkości napełnienia kompozytów proszkiem kulistym na maksymalną gęstość energii magnetycznej $(BH)_{max}$ dla próbek otrzymanych przy ciśnieniu 110 MPa i zmiennej temperaturze wtryskiwania

Fig. 5. Influence of the filling ratio of the composite by the spheroidal powder on $(BH)_{max}$ samples injected at constant pressure (110 MPa) and variable temperature



Rys. 6. Wpływ wielkości napełnienia kompozytów proszkiem kulistym na maksymalną gęstość energii magnetycznej $(BH)_{max}$ dla próbek otrzymanych przy temperaturze 200°C i zmiennym ciśnieniu wtryskiwania

Fig. 6. Influence of the filling ratio of the composite by the spheroidal powder on $(BH)_{max}$ samples injected at constant temperature (200°C) and variable pressure

Na podstawie przebiegu zależności można stwierdzić, że największy wpływ na zmianę maksymalnej energii magnetycznej $(BH)_{max}$ kształtek wywiera ilość

proszku magnetycznego wprowadzonego do kompozytu, a następnie kształt ziaren proszku, przy czym wyższe wartości są dla kształtek z proszkiem płatkowym. Wpływ parametrów wtryskiwania kompozytów na wartość maksymalnej energii magnetycznej kształtek jest bez porównania mniejszy. W zastosowanym zakresie ciśnienia wtryskiwania nie przekracza wartości 10,3%, a dla zmiennej temperatury wtryskiwania dochodzi do 6%. Parametry przetwórcze wywierają wpływ pośredni na zmianę $(BH)_{max}$. Wynika on z poprawienia warunków wtryskiwania. Wyższa temperatura wtryskiwania powoduje zmniejszenie lepkości wtryskiwanego kompozytu, a wysokie ciśnienie wtryskiwania silnie oddziałuje na wtryskiwaną masę, prowadząc do lepszego upakowania kompozytu, co obserwowane jest jako wzrost gęstości próbek.

WNIOSKI Z PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- Największy wpływ na wartość energii magnetycznej kształtek $(BH)_{max}$ wywiera ilość wprowadzonego do kompozytu proszku magnetycznego. Zwiększenie napełnienia kompozytów proszkami prowadzi do zwiększenia maksymalnej energii magnetycznej, a więc do uzyskania lepszych magnesów.
- Przy jednakowej wielkości napełnienia kompozytów proszkiem magnetycznym wyższe wartości $(BH)_{max}$ można osiągnąć dla kształtek zawierających proszek płatkowy. Dla największego możliwego napełnienia kompozytów proszkami maksymalne wartości energii magnetycznej są do siebie zbliżone, gdyż ilość wprowadzonego do kompozytu proszku kulistego może być większa niż dla proszku płatkowego.
- Wpływ parametrów przetwórczych, a więc temperatury i ciśnienia wtryskiwania, na wartość energii magnetycznej kształtek jest niewielki i zazwyczaj nie przekracza kilku procent. Stwierdzenie to jest istotne przy produkcji wielkoseryjnej, gdyż niewielkie wahania parametrów przetwórczych nie wpływają w sposób istotny na osiągnięte wyniki.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2008 jako projekt badawczy nr MNiSzW Nr N508 023 31/1424.

LITERATURA

- [1] Leonowicz M., Nowoczesne materiały magnetycznie twarde, wybrane zagadnienia, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996.
- [2] Janta T., Węgliński B., Wpływ rodzaju dielektryku na właściwości dielektromagnetyków, Kompozyty (Composites) 2003, 3, 7, 165-171.

- [3] Ślusarek B., Biało B., Gromek J. Kulesza T., Effects of injection conditions on the mechanical properties of Nd-Fe-B dielectromagnets, *Journal of Magnetism* 1999, 4, 2, 52-54.
- [4] Badanie wpływu fazy proszkowej Nd-Fe-B i polimerowej osnowy na właściwości magnetyczne i mechaniczne elementów kompozytowych, grant dz. Wydz. Mechatroniki, Politechniki Warszawskiej Nr 503G-1142/0013-003, 2004.
- [5] Ślusarek B., Paszkowski L., Biało D., The influence of kind powder on physical properties of Nd-Fe-B dielectromagnets, *Euro PM* 2004, 17-21 October 2004 Vienna, 555-560.
- [6] Katalog firmy Magnequench International, Indiana.
- [7] Katalog firmy DWORY S.A., Oświęcim.