



Waldemar Kaszuwara<sup>1\*</sup>, Artur Witkowski<sup>2</sup>, Marcin Leonowicz<sup>3</sup>, Rafał Wróblewski<sup>4</sup>  
Aleksander Wernik<sup>5</sup>, Piotr Pawlik<sup>6</sup>

<sup>1-5</sup> Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Centrum Doskonałości NanoCentre, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa, Poland

e-mail: \*wkaszu@inmat.pw.edu.pl

<sup>6</sup> Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, Poland

Otrzymano (Received) 30.01.2007

## BUDOWA FAZOWA I WŁAŚCIWOŚCI MAGNETYCZNE DEWITRYFIKOWANYCH SZKIEŁ $XBaO-6Fe_2O_3-B_2O_3$ ( $X = 1-5$ )

Interesującą metodą otrzymywania nanokrystalicznych magnetycznie twardych ferrytów jest amorfizacja materiału wyjściowego przez szybkie chłodzenie ze stanu ciekłego i dewitryfikacja otrzymanych szkieł. Zeszklenie materiału umożliwia dodatek tlenku szklotwórczego, np.  $B_2O_3$ . Skład chemiczny materiałów z układu  $BaO-Fe_2O_3-B_2O_3$  ma podstawowy wpływ na skład fazowy i właściwości magnetyczne uzyskiwane po odlewaniu i dewitryfikacji. W pracy przedstawiono wpływ zawartości  $BaO$  w materiale  $XBaO6Fe_2O_3B_2O_3$  ( $X = 1-5$ ) na skład fazowy i właściwości magnetyczne. Po procesie odlewania uzyskano materiał złożony z faz krystalicznych i fazy amorficznej. Do zawartości  $BaO$   $X = 2$  obserwowano wydzielenia fazy  $Fe_3O_4$ , natomiast przy większych zawartościach pojawiały się fazy zawierające  $Ba$ . Po dewitryfikacji w temperaturze  $950^\circ C$  i czasie 1 h dla zawartości  $BaO$   $X = 3$  uzyskano wyłącznie fazę o składzie zbliżonym do heksagonalnego ferrytu baru  $Ba_{0,91}Fe_{11,68}O_{18,2}$ . Przy mniejszych zawartościach  $BaO$  występował tlenek  $Fe_2O_3$ , przy większych zaś ferryt o strukturze spinelu  $BaFe_2O_4$ . Najwyższe wartości koercji osiągnięto dla materiału  $2BaO6Fe_2O_3B_2O_3$ , natomiast remanencja osiągała maksimum w zakresie od  $X = 2$  do  $X = 3$ .

Słowa kluczowe: ceramika, materiały magnetycznie twarde, szybkie chłodzenie

## PHASE CONSTITUTION AND MAGNETIC PROPERTIES OF MAGNETS PROCESSED BY DEVITRIFICATION OF $XBaO-6Fe_2O_3-B_2O_3$ GLASSES ( $X = 1-5$ )

An interesting method of the processing of hard ferrites comprises amorphisation of the starting material by rapid solidification followed by subsequent devitrification of the glassy precursor. The  $B_2O_3$  was used as a vitrification agent. Chemical composition of the alloys from the  $BaO-Fe_2O_3-B_2O_3$  system has a decisive effect on the phase constitution and magnetic properties of the final product. In this study the influence of the amount of the  $BaO$  in the  $XBaO6Fe_2O_3B_2O_3$  ( $X = 1-5$ ) system on the phase constitution and properties of the magnets was studied. After rapid solidification the material comprised both amorphous and crystalline phases. Up to  $BaO$  content  $X = 2$  precipitation of  $Fe_3O_4$  was observed; for the higher contents phases containing  $Ba$  appeared. After devitrification at  $950^\circ C$  for 1 h, for  $BaO$  content  $X = 3$ , only the phase close to the hexagonal barium ferrite  $Ba_{0,91}Fe_{11,68}O_{18,2}$  was obtained. For lower and higher  $BaO$  concentrations,  $Fe_2O_3$  and spinel  $BaFe_2O_4$ , respectively were observed. The best coercivity was obtained for the  $2BaO6Fe_2O_3B_2O_3$ , whereas the remanence attained maximum for the  $BaO$  in the range  $X = 2$  do  $X = 3$ .

Keywords: ceramics, permanent magnets, rapid solidification

## WPROWADZENIE

Od kilku lat widoczny jest wzrost zainteresowania naukowców magnetycznie twardymi ferrytami baru i strontu. Wynika to z możliwości perspektywy zastosowania ich jako nośników informacji o ultradużych gęstościach zapisu. Dotychczasowe prace dowiodły, że możliwe jest podwyższenie właściwości magnetycznych ferrytów, zwłaszcza koercji, przez rozdrobnienie ziarna do wielkości nanometrów [1]. Wiele prac poświęca się wykorzystaniu metody mechanicznej syntezy lub mechanicznego mielenia ferrytów magnetycznie

twardych w celu uzyskania ziaren o wielkości nanometrów. Podejmowano również badania możliwości wytworzenia nanokompozytów  $BaFe_{12}O_{19}-Fe$  np. metodą kontrolowanej redukcji w odpowiednich atmosferach [2], jednak próby te skończyły się niepowodzeniem, ponieważ nie stwierdzono występowania zjawiska podwyższenia remanencji. Wiele publikowanych prac dotyczy badań nad metodą otrzymywania nanokrystalicznych ferrytów przez dewitryfikację szkieł. Jej podstawową zaletą jest możliwość uzyskania materiału

litego o określonym kształcie, a więc mającego właściwości użytkowe.

Substancjami wyjściowymi są tlenek lub węglan baru (strontu),  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oraz tlenki szklotwórcze. Dodatki tlenków szklotwórczych są konieczne dla uzyskania struktury amorficznej w początkowym etapie procesu. W większości prac jako tlenki szklotwórcze stosowane są:  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Mieszanina proszków o odpowiednim składzie chemicznym poddawana jest wyżarzaniu ujednorodniającemu. W efekcie uzyskuje się skład fazowy zgodny z układem równowagi [3-5]. Materiał następnie jest topiony i szybko chłodzony ze stanu ciekłego. Uzyskany produkt posiada strukturę amorficzną lub składa się z mieszaniny fazy amorficznej i wydzielen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [6].

Krystalizacja szkieł przy nagrzewaniu rozpoczyna się w temperaturze około  $550^\circ\text{C}$ . Sekwencja przemian fazowych zależy od składu chemicznego, a przede wszystkim od rodzaju użytego tlenku szklotwórczego. W szklach zawierających stront w obecności  $\text{B}_2\text{O}_3$  obserwowano powstawanie następujących faz:  $\text{SrB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_{1,7}\text{FeB}_x\text{O}_y$ ,  $\text{Sr}_2\text{B}_2\text{O}_5$  i  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ , natomiast w obecności  $\text{B}_2\text{O}_3$  i  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ :  $\text{SrBi}_2\text{O}_4$ ,  $\text{SrB}_2\text{O}_4$ ,  $\text{Sr}_6\text{BiFeB}_x\text{O}_y$ ,  $\text{BiFeO}_3$  i  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  [7, 8]. Dewitryfikacja może być prowadzona w zakresie temperatur  $600+1000^\circ\text{C}$ . Uzyskany materiał posiada strukturę kompozytu, tzn. magnetycznie twarde wydzielenia ferrytu odizolowane są niemagnetyczną osnową faz z układu BaO - tlenek szklotwórczy. Według informacji literaturowych, wydzielenia ferrytu posiadają średnicę od 40 do około 300 nm oraz grubość od 10 do 50 nm (odpowiednio dla temperatur  $550$  i  $1000^\circ\text{C}$ ) [7].

Ważnym problemem w przypadku materiałów trójskładnikowych, w których dodatkowo istnieje możliwość wyboru różnych tlenków szklotwórczych, jest optymalizacja składu chemicznego. W literaturze nie są publikowane optymalne składy chemiczne materiałów, natomiast stosowane są różne tlenki szklotwórcze. Niniejsza praca zawiera wyniki badań prezentujące wpływ zawartości tlenku BaO w wyjściowym materiale na skład fazowy i właściwości magnetyczne materiałów otrzymanych przez dewitryfikację szkieł  $\text{XBaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ .

## METODYKA BADAŃ

Jako materiałów wyjściowych użyto: węglanu baru  $\text{BaCO}_3$ , tlenku żelaza  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  i tlenku boru  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Składniki te były mieszane w takich proporcjach, aby po termicznym rozkładzie węglanu baru uzyskać materiały o składzie  $\text{XBaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$ , gdzie  $X = 1+5$ .

Mieszaniny proszków były prasowane i wyżarzane w temperaturze  $1000^\circ\text{C}$  przez 24 h w atmosferze powietrza. Tak uzyskane materiały wyjściowe były topione za pomocą palnika (temperatura około  $1400^\circ\text{C}$ ) w tyglach szamotowych i odlewane z zasysaniem do formy po-

zwalającej na otrzymanie próbek w kształcie walca o średnicy 2 mm. Podciśnienie przy odlewaniu zostało wytworzone za pomocą pompy rotacyjnej. Zastosowano zbiornik wyrównawczy ciśnienia o objętości ok.  $1 \text{ m}^3$ .

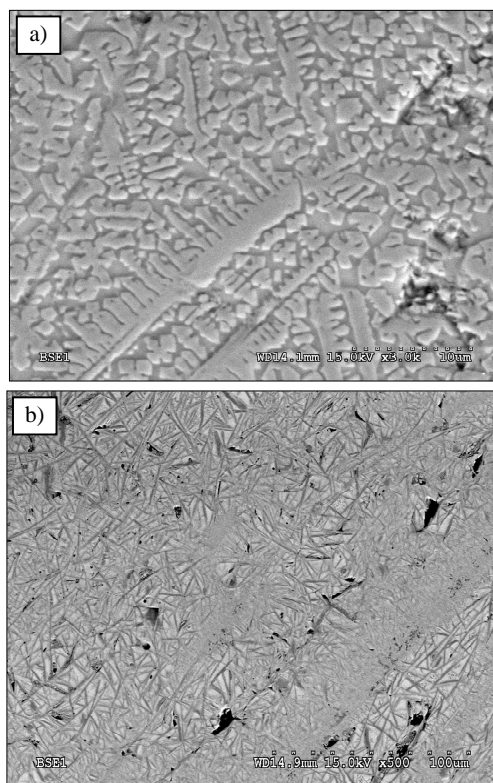
Po odlaniu próbki poddano wyżarzaniu w temperaturach  $950$  i  $1100^\circ\text{C}$ , w ciągu 1 h i atmosferze powietrza.

Struktura fazowa materiałów bezpośrednio po odlewaniu oraz następującym później wyżarzaniu była badana metodą rentgenowskiej analizy fazowej oraz za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Pomiary wielkości krystalitów fazy  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  przeprowadzono metodą Scherrera dla pików (114).

Badania magnetyczne przeprowadzono za pomocą magnetometru z drgającą próbką (VSM).

## WYNIKI BADAŃ

Materiały bezpośrednio po odlewaniu poddano badaniom za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego. Obserwowana struktura była zależna od zawartości BaO. Generalnie we wszystkich badanych materiałach występowały fazy krystaliczne w postaci dendrytów lub igieł na tle obszarów fazy amorficznej (rys. 1).

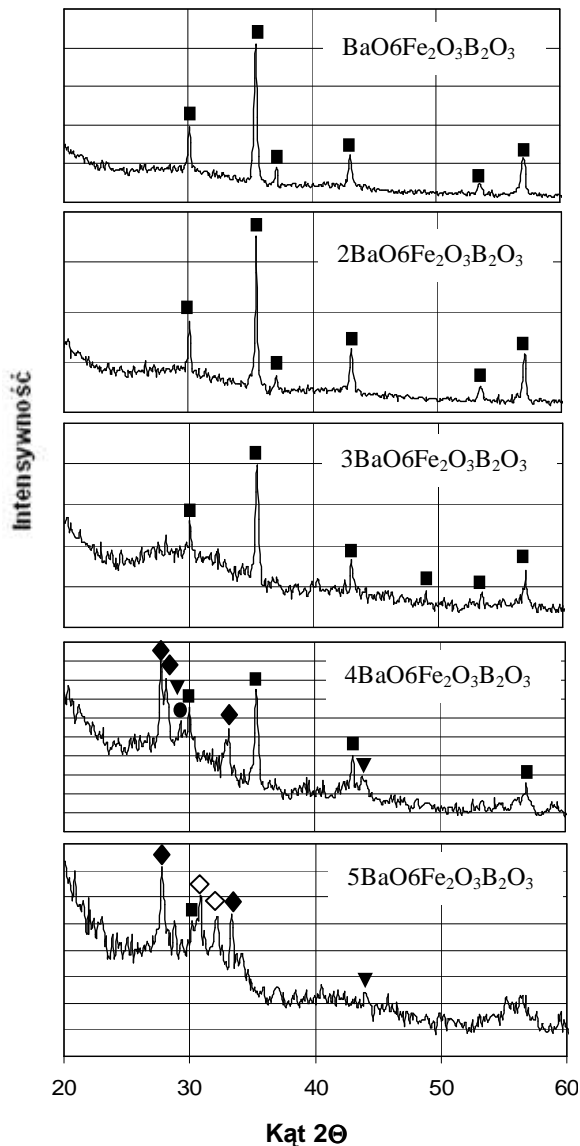


Rys. 1. Obraz BSE materiałów:  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$  (a) i  $5\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$  (b) bezpośrednio po odlewaniu

Fig. 1. BSE image of as-cast  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$  (a) and  $5\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$  (b) materials

Analiza składu chemicznego próbki  $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{B}_2\text{O}_3$  wykazała, że materiał uległ zanieczyszczeniu Al i Si,

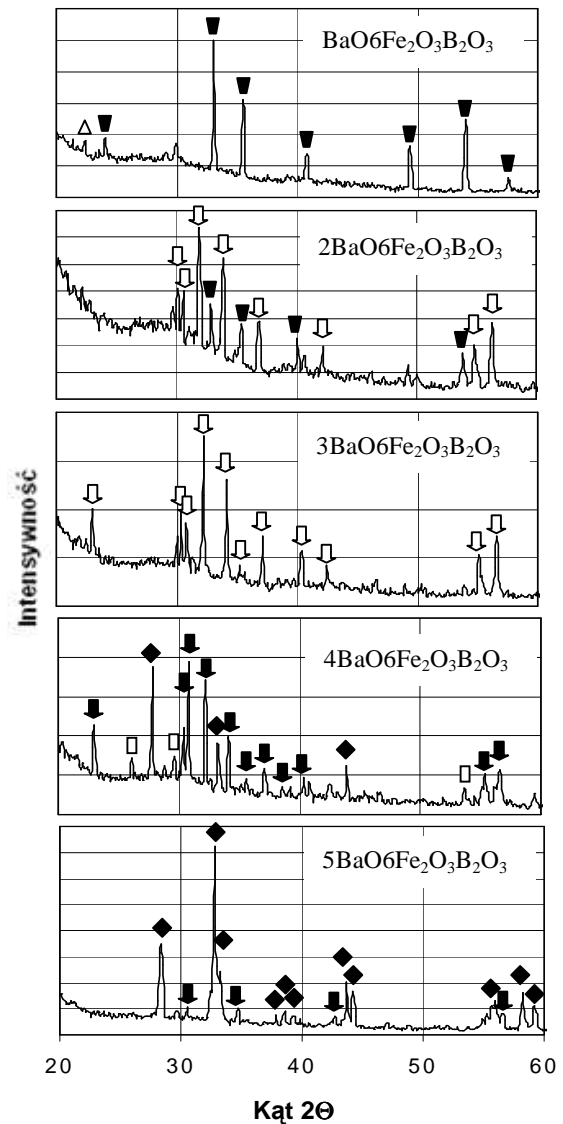
które pochodzą z użytego tygla szamotowego. Ciemniejsze obszary analizowanej próbki (rys. 1a) posiadają skład chemiczny (w % at.): 69,2% O, 24,0% Fe, 1,3% Ba oraz zanieczyszczenia 2,8% Al i 2,7% Si. Jednolite jaśniejsze obszary posiadają skład 55,7% O, 10,7% Fe, 25,6% B, 2,3% Ba, 3,7% Si i 2,0% Al. Zawartość zanieczyszczeń jest generalnie na poziomie 5÷6%. Wprowadzone w czasie odlewania tlenki Si i Al mają działanie szkłotwórcze, podobnie jak zastosowany  $B_2O_3$ .



Rys. 2. Dyfrakcyjna analiza fazowa materiałów  $XBaO_6Fe_2O_3B_2O_3$  ( $X = 1+5$ ) bezpośrednio po odlewniu: ■ -  $Fe_3O_4$ , ◆ -  $BaFe_2O_4$ , ● -  $Ba_2FeO_4$ , ◇ -  $Ba_2Fe_2O_5$ , ▼ -  $FeAl_2$

Fig. 2. XRD analysis of as-cast  $XBaO_6Fe_2O_3B_2O_3$  ( $X = 1+5$ ) samples: ■ -  $Fe_3O_4$ , ◆ -  $BaFe_2O_4$ , ● -  $Ba_2FeO_4$ , ◇ -  $Ba_2Fe_2O_5$ , ▼ -  $FeAl_2$

Składy fazowe materiałów bezpośrednio po odlewniu zostały określone metodą rentgenowskiej analizy fazowej (rys. 2). Zastosowane warunki chłodzenia nie pozwoliły na pełną amorfizację materiału. Przy udziale BaO od 1 do 3 widoczne są piki od fazy  $F_3O_4$ .



Rys. 3. Dyfrakcyjna analiza fazowa materiałów  $XBaO_6Fe_2O_3B_2O_3$  ( $X = 1+5$ ) po odlewniu i wyżarzeniu  $950^\circ C$  w czasie 1 h. ▼ -  $Fe_2O_3$ , ◆ -  $BaFe_2O_4$ , ▽ -  $Ba_{0.91}Fe_{11.68}O_{18.02}$ , ▾ -  $BaFe_{12}O_{19}$ , □ -  $Ba_2SiO_4$ , △ -  $BaSi_4O_{10}$

Fig. 3. XRD analysis of  $XBaO_6Fe_2O_3B_2O_3$  ( $X = 1+5$ ) samples devitrified at  $950^\circ C$  within 1 h: ▼ -  $Fe_2O_3$ , ◆ -  $BaFe_2O_4$ , ▽ -  $Ba_{0.91}Fe_{11.68}O_{18.02}$ , ▾ -  $BaFe_{12}O_{19}$ , □ -  $Ba_2SiO_4$ , △ -  $BaSi_4O_{10}$

Na podstawie rentgenogramów można stwierdzić, że wzrost zawartości BaO prowadzi do wzrostu udziału fazy amorficznej, w której znajduje się cała zawartość tlenku baru.

Przy zawartościach BaO równych 4 i 5 pojawiają się fazy zawierające Ba:  $BaFe_2O_4$ ,  $Ba_2FeO_4$  i  $Ba_2Fe_2O_5$ . Widoczne są pojedyncze piki od faz tworzonych przez zanieczyszczenia Al i Si. Można stwierdzić, że BaO do zawartości  $X = 3$  wchodzi w skład fazy amorficznej.

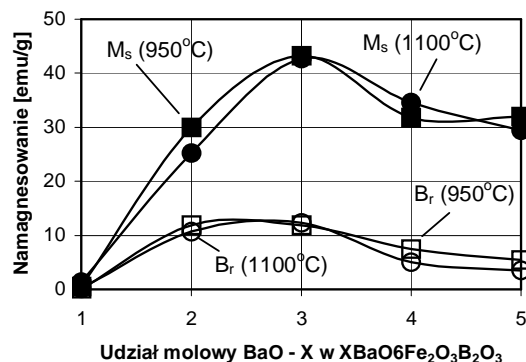
Wyżarzanie (dewitryfikacja) badanych materiałów w temperaturze  $950^\circ C$  przez 1 h zmienia ich skład fazowy (rys. 3). Przy składzie chemicznym  $BaO_6Fe_2O_3B_2O_3$  powstaje faza  $Fe_2O_3$ . Przy zawartości

$\text{BaO}$   $X = 2$  na dyfraktogramie pojawiają się piki odpowiadające fazie o składzie chemicznym zbliżonym do heksagonalnego ferrytu baru ( $\text{Ba}_{0,91}\text{Fe}_{11,68}\text{O}_{18,2}$ ). Towarzyszy jej faza  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Dla  $X = 3$  występuje wyłącznie faza  $\text{Ba}_{0,91}\text{Fe}_{11,68}\text{O}_{18,2}$ . W próbce  $4\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$  obecny jest już stechiometryczny ferryt baru  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ , a dodatkowo pojawia się bogatszy w Ba ferryt o strukturze spinelu -  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$ . Dla  $5\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$  ferryt  $\text{BaFe}_2\text{O}_4$  jest podstawową fazą. Widoczne są śladowe piki od ferrytu o strukturze heksagonalnej.

Optymalna, ze względu na właściwości magnetyczne, struktura fazowa tych materiałów powinna zawierać wydzielenia heksagonalnego ferrytu baru odizolowane fazą szklaną złożoną z tlenków  $\text{B}_2\text{O}_3$  i  $\text{BaO}$ . Najbardziej zbliżony do takiego składu fazowego stwierdzono w próbce  $3\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ . Przy mniejszym niedoborze  $\text{BaO}$  pozostają w strukturze tlenki Fe, natomiast przy jego nadmiarze tworzą się fazy bogate w Ba.

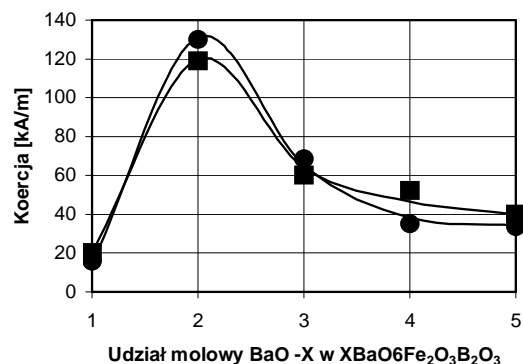
Właściwości magnetyczne materiałów zależą od temperatury dewitryfikacji, chociaż różnice w osiągniętych wartościach koercji po wyżarzaniu w  $950^\circ\text{C}$  i  $1100^\circ\text{C}$  nie są duże. Najwyższe wartości remanencji osiągnięto dla materiału  $3\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ , który posiada jako fazę krystaliczną wyłącznie  $\text{Ba}_{0,91}\text{Fe}_{11,68}\text{O}_{18,2}$  (rys. 4). Odchylenia od tego składu chemicznego powodują, że w materiale pojawiają się fazy o mniejszym namagnesowaniu nasycenia, co w rezultacie obniża remanencję. Maksymalne wartości koercji uzyskano dla materiału  $2\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ , zawierającego pewien udział fazy magnetycznie miękkiej  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (rys. 5). Przeprowadzono pomiary wielkości kryształitów, metodą Scherrera, heksagonalnego ferrytu baru ( $\text{Ba}_{0,91}\text{Fe}_{11,68}\text{O}_{18,2}$  w próbce  $X = 2$  i  $3$  oraz  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$  w próbce  $X = 4$ ). Zmierzone wielkości wynoszą: dla  $X = 2 \pm 58$  nm, dla  $X = 3 \pm 67$  nm i dla  $X = 4 \pm 87$  nm. Wynika stąd, że wzrost udziału fazy szklistej, wywołany zwiększeniem zawartości  $\text{BaO}$ , ułatwia dyfuzję i prowadzi do rozrostu kryształitów ferrytu baru. Zwiększenie wielkości kryształitów jest czynnikiem obniżającym koercję, jednak wątpliwe jest, aby rozrost ziarna w zmierzonym zakresie wielkości prowadził do spadku koercji o około 50%. Również fakt, że dla składu  $X = 2$  uzyskano wyższą koercję przy wyżarzaniu w temperaturze wyższej ( $1100^\circ\text{C}$ ) niż przy wyżarzaniu w temperaturze  $950^\circ\text{C}$  wskazuje, że wielkość kryształitów nie jest czynnikiem decydującym. Zwiększenie zawartości  $\text{BaO}$  od  $X = 2$  do  $X = 3$  umożliwia reakcję całej zawartości Fe do ferrytu baru (przy  $X = 2$  część Fe pozostaje związana w  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) i zwiększa się udział fazy  $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ . O wzroście udziału tej fazy świadczy większe namagnesowanie nasycenia ( $M_s$ ) próbki o zawartości  $\text{BaO}$   $X = 3$ . Zakładając, że wartość  $M_s$  jest proporcjonalna do udziału heksagonalnego ferrytu baru można oszacować, że udział tej fazy rośnie o około 45%. Interesujące jest, że wartości remanencji i namagnesowania nasycenia nie spełniają prawa Stonnera-Wohlfartha dla zawartości  $\text{BaO}$   $X > 2$  ( $B_r \neq M_s/2$ ). Należy sądzić, że nie są

spełnione założenia tej teorii, tzn. cząstki nie są jednodomenowe lub oddziałują na siebie magnetycznie. Można wnioskować, że w materiale o zawartości  $\text{BaO}$   $X = 2$  jednodomenowe wydzielenia ferrytu baru mogą być odizolowane niemagnetyczną fazą szklaną, natomiast w materiale o  $X = 3$  mogą tworzyć polikrystaliczne obszary o wielkości większej niż cząstka jednodomenowa. Tłumaczy to zależność koercji od składu chemicznego.



Rys. 4. Wpływ udziału  $\text{BaO}$  ( $X$  w  $\text{XBaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ ) na remanencję  $B_r$  i namagnesowanie nasycenia  $M_s$  odpowiednio dla materiałów wyżarzanych w temperaturze  $950^\circ\text{C}$  (■ i □) i  $1100^\circ\text{C}$  (● i ○)

Fig. 4. Effect of  $\text{BaO}$  content ( $X$  in  $\text{XBaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ ) on the remanence  $B_r$  and saturation magnetisation  $M_s$  for samples annealed at  $950^\circ\text{C}$  (■ and □) respectively and  $1100^\circ\text{C}$  (● and ○) respectively



Rys. 5. Wpływ udziału  $\text{BaO}$  ( $X$  w  $\text{XBaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ ) na koercję dla materiałów wyżarzanych w temperaturze  $950^\circ\text{C}$  (■) i  $1100^\circ\text{C}$  (●)

Fig. 5. Effect of  $\text{BaO}$  content ( $X$  in  $\text{XBaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ ) on the coercivity  $H_c$  for samples annealed at  $950^\circ\text{C}$  (■) and  $1100^\circ\text{C}$  (●)

Za optymalny skład chemiczny, zapewniający najwyższe właściwości magnetyczne, należy uznać zawartość około  $2\text{BaO}$ . Skład fazowy materiału o zawartości  $3\text{BaO}$  wskazuje, że możliwe byłoby uzyskanie dobrych właściwości magnetycznych. Możliwości podwyższenia koercji tego materiału można poszukiwać przez optymalizację parametrów odlewania i dewitryfikacji.

## WNIOSKI

1. Składy chemiczne materiałów pozwalające na uzyskanie wysokich właściwości magnetycznych to

- $2\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$  i prawdopodobnie  $3\text{BaO}6\text{Fe}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ . Cechują się one dużą zawartością heksagonalnego ferrytu baru.
- Zawartość BaO mniejsza od  $X = 3$  prowadzi do obecności tlenku  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , natomiast większe zawartości powodują powstanie ferrytu o strukturze spinelu.
  - Przy zawartościach BaO większych od  $X = 2$  remanencja i namagnesowanie nasycenia nie spełniają zależności Stonnera-Wohlfartha. Świadczy to o niespełnieniu założeń tego prawa, tzn. wydzielenia ferrytu baru nie są odizolowane i oddziałują na siebie magnetycznie.

## LITERATURA

- [1] Bercoff P.G., Bertorello H.R., High-energy ball milling of Ba-hexaferrite/Fe magnetic composite, *J. Magn. Magn. Mat.* 1998, 187,169.
- [2] Masafumi Koike, Osami Abe, Redox synthesis of magnetite powder under mixing-grinding of metallic iron hydrated iron oxide, *Solid State Ionics* 2004, 172, 217.
- [3] Zaitsev D.D., Kazin P.E., Tret'yakov Yu.D., Jansen M., Phase formation in the  $\text{SrO-B}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  system, *Russian Journal of Inorganic Chemistry* 2003, 11, 1717.
- [4] Zaitsev D.D., Kazin P.E., Tret'yakov Yu.D., Jansen M., Phase relations in the  $\text{SrO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$  system, *Inorganic Materials* 2003, 12, 1319.
- [5] Sato H., Liquidus surface and isothermal section diagram at 1073 K in the  $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3\text{-(0-50 mol \%)}\text{B}_2\text{O}_3$  pseudo-ternary system, *Mater. Trans., JIM* 1996, 11, 1672.
- [6] Zaitsev D.D., Kazin P.E., Garshew A.V., Tret'yakov Yu.D., Jansen M., Synthesis and magnetic properties of  $\text{SrO-Fe}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$  glass-ceramics, *Inorganic Materials* 2004, 8, 881.
- [7] Zaitsev D.D., Kazin P.E., Tret'yakov Yu.D., Synthesis of  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  based nanocomposites from the bismuth-boron-oxide glasses, *Join European Magnetic Symposia*, Drezno, 5-10.09.2004, 51.
- [8] Sato H., Umeda T., Grain growth of strontium ferrite crystallized from amorphous phases, *Mater. Trans., JIM* 1993, 1, 76.