

Waldemar Kaszuwara<sup>1</sup>

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

## ZASTOSOWANIE MODELU GEOMETRYCZNEGO DO OPISU PODWYŻSZENIA REMANENCJI W MAGNETYCZNIE TWARDYCH NANOKOMPOZYTACH TYPU RE-M

Opracowano model wiążący zjawisko podwyższonej remanencji ze strukturą fazową magnesów nanokrystalicznych (nanokompozytowych). Przyjęto, że w próbce izotropowej, której remanencję można obliczyć z prawa Stonera-Wohlfartha, w wyniku działania zjawiska podwyższenia remanencji tworzy się pewien obszar o właściwościach materiału anizotropowego. Powstaje on wokół ziaren fazy magnetycznie twardej zorientowanych osi łatwego namagnesowania w kierunku zewnętrznego pola magnetycznego i rozciąga się na odległość  $L = (A/K_1)^{1/2}$  ( $A$  - stała wymiany,  $K_1$  - stała anizotropii) od ich powierzchni. Wkład tych obszarów w sumaryczną wartość remanencji magnesu równy jest iloczynowi ich udziału i namagnesowania nasycenia fazy objętej oddziaływaniami wymiennymi. Zależność remanencji od zawartości pierwiastka ziem rzadkich obliczona według takiego modelu posiada trzy zakresy zmienności. Opracowany model dobrze opisuje wyniki doświadczalne uzyskane dla magnesów Nd-Fe-B i Sm-Fe-N, otrzymanych metodą mechanicznej syntezy.

Słowa kluczowe: nanokompozyty magnetycznie twarde, magnesy Nd-Fe-B

### APPLICATION OF THE GEOMETRICAL MODEL TO DESCRIPTION OF THE REMANENCE ENHANCEMENT IN HARD MAGNETIC RE-M NANOCOMPOSITES

A simple geometrical model which describes enhanced remanence in nanocrystalline magnetic materials in terms of their phase constitution has been formulated. It has been assumed that in isotropic material, the remanence value which can be calculated on a basis of the Stoner-Wohlfarth model for the non interacting single domain particles, some proportion of its volume attains the properties characteristic of an anisotropic material. The magnetically aligned material ranges in the vicinity of magnetically hard crystallites, easy magnetisation axes of which are oriented parallel to the external magnetic field. The length of these exchange interactions  $L$  can be expressed by  $L = (A/K_1)^{1/2}$  (where  $A$  - exchange constant,  $K_1$  - first anisotropy constant). Contribution of this aligned material to the total remanence value of the magnet is equal to the product of its volume fraction and saturation magnetisation. The dependence of the remanence value on the rare earth content, which can be calculated on a basis of this model, exhibits three distinct parts origin of which has been explained. The calculated values of the remanence are in good agreement with the experimental data for Nd-Fe-B and Sm-Fe-N magnets prepared by mechanical alloying.

Key words: hard magnetic nanocomposites, Nd-Fe-B permanent magnets

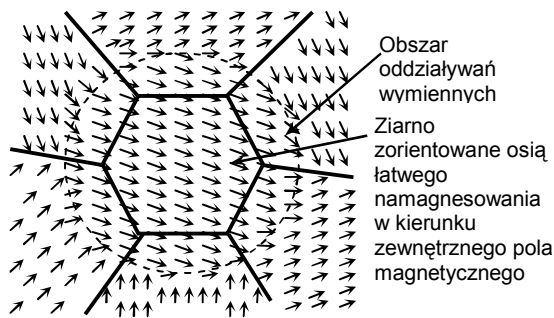
## WPROWADZENIE

Nanokrystaliczne materiały magnetycznie twarde zawierające w swojej mikrostrukturze obok fazy magnetycznie twardej wydzielenia wolnego Fe nazywane są nanokompozytami [1]. Jest to uzasadnione nie tylko obecnością dwóch komponentów o różnych właściwościach, ale również zmianami właściwości materiału wynikającymi z nanokrystaliczności i oddziaływań pomiędzy fazami. Osiągane właściwości magnetyczne kształtowane są w tym przypadku przez magnetyczne oddziaływania wymienne pomiędzy atomami sąsiadujących ziaren. Efektem tych oddziaływań jest między innymi zjawisko podwyższenia remanencji. Wynika ono z dążenia materiału do minimalizacji pól wymiany i anizotropii. Minimalizacja pola wymiany następuje w przypadku ustawienia równoległego momentów

magnetycznych atomów sąsiednich ziaren. Minimalizacja pola anizotropii następuje, gdy momenty te są ustawione równoległe do kierunku krystalograficznego (osi) łatwego namagnesowania. W fazach, w których pole wymiany jest większe od pola anizotropii, następuje ukierunkowanie momentów magnetycznych w atomach ziaren zorientowanych niekorzystnie do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego, wymuszone oddziaływaniami wymiennymi atomów ziaren, których kierunek łatwego namagnesowania zorientowany jest równoległe do kierunku zewnętrznego pola magnetycznego. Oddziaływania te rozciągają się na ziarna sąsiednie na pewną odległość - tzw. odległość korelacji. W przypadku materiałów nanokrystalicznych oddziaływania wymienne obejmują na tyle dużą objętość materiału, że powodują

<sup>1</sup> dr inż.

podwyższenie jego mierzonej wartości remanencji (rys. 1).



Rys. 1. Schemat działania zjawiska podwyższonej remanencji w jednofazowym materiale magnetycznie twardym

Fig. 1. Arrangement of the magnetic moments in a single phase material exhibiting enhanced remanence

Dotychczas podejmowane były próby ilościowego opisu zależności właściwości magnetycznych nanokompozytów magnetycznie twardych od wybranych parametrów [2, 3]. Zadowalające rezultaty otrzymywano, stosując teorię elementów skończonych do modelowych struktur złożonych z kilkudziesięciu ziaren [3]. Założona mikrostruktura nie uwzględniała jednak wielu elementów mikrostruktury rzeczywistej, które mają znaczący wpływ na zjawisko podwyższonej remanencji. W niniejszej pracy do ilościowego opisu zmian remanencji w zależności od zawartości pierwiastka RE w stopie zastosowano prosty model oparty jedynie na zależnościach geometrycznych. Zależności określone na podstawie modelu zweryfikowano przez porównanie z wynikami doświadczalnymi. W badaniach uwzględniono również materiały RE-M nienazywane w literaturze nanokompozytami (o zawartości pierwiastka RE większej niż zawartość stechiometryczna w fazie magnetycznie twardej). Jest to uzasadnione, ponieważ w metastabilnej strukturze tych materiałów wydzielenia Fe występują dla szerszego zakresu zawartości pierwiastka RE.

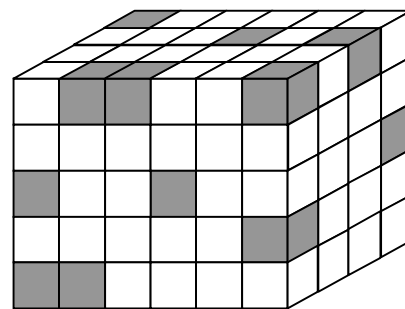
## WYNIKI BADAŃ

### Geometryczny model zjawiska podwyższenia remanencji

Obliczenia modelowe prowadzono przy założeniu, że w izotropowym materiale, na skutek działania zjawiska podwyższonej remanencji wokół ziaren zorientowanych osią „c” struktury tetragonalnej zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego powstają obszary anizotropowe. Objętość tych obszarów można obliczyć, znając odległość korelacji dla oddziaływań pomiędzy dwoma ziarnami fazy magnetycznie twardej oraz ziarnami fazy magnetycznie twardej

i miękkiej. Zastosowanie prawa Stonera-Wohlfartha [4] pozwala na określenie remanencji dla magnesu traktowanego jako zbiór obszarów izotropowych i anizotropowych. Model nie ma charakteru fizycznego, ale jego zastosowanie pozwala na lepsze poznanie uwarunkowań zjawiska podwyższonej remanencji. Analizując zależności osiąganych wartości remanencji od zawartości fazy magnetycznie miękkiej obliczone na podstawie modelu i wyznaczone doświadczalnie, można ocenić istotność wpływu na tę zależność wybranych parametrów mikrostruktury.

Prezentowany model dotyczy materiałów dwufazowych zawierających ziarna fazy magnetycznie twardej i fazy magnetycznie miękkiej (materiałów nanokompozytowych) lub paramagnetycznej. Założono, że mikrostruktura składa się z dwóch rodzajów przypadkowo rozmieszczonych ziaren o kształcie sześcianów o boku „a” całkowicie wypełniających przestrzeń (rys. 2). Do obliczeń przyjęto jednakową wielkość wszystkich ziaren.



Rys. 2. Model struktury fazowej dwufazowego materiału magnetycznie twardego

Fig. 2. Geometry of the two phase nanocomposite material

Udział ziaren fazy mniejszościowej (magnetycznie miękkiej - M) oznaczono jako „c”. Udział fazy podstawowej (magnetycznie twardej - T) równy jest „b”, a dla przypadku, gdy występują tylko dwie fazy „b = (1-c)”. W tak zdefiniowanym materiale występują 3 rodzaje granic ziaren M/T M/M i T/T. Udziały poszczególnych rodzajów granic ziaren, oznaczone odpowiednio  $C^{M/T}$ ,  $C^{M/M}$  i  $C^{T/T}$ , zależą od zawartości występujących faz. Udziały te określono dla przypadku dwóch faz, interpolując wielomianem 2 stopnia linię wyznaczoną przez 3 punkty: dla c = 0 granice T/T stanowią 100%, dla c = 1 granice M/M stanowią 100%, natomiast dla c = 0,5 granice M/T to 50%, M/M - 25% i T/T - 25%.

Przyjęto założenie, że 1/3 ziaren fazy magnetycznie twardej posiada kierunek łatwego namagnesowania zgodny z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego. Zasięg oddziaływań wymiennych, tzw. odległość korelacji, można obliczyć ze wzoru

$$L = (A/K_1)^{1/2}$$

gdzie:  $L$  - odległość korelacji,  $A$  - stała wymiany,  $K_1$  - stała anizotropii. Oddziaływania wymienne od ziaren zorientowanych zgodnie z kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego rozciągają się na ziarna fazy magnetycznie miękkiej na odległość  $L^M$  i magnetycznie twardej  $L^T$ . Wartości  $L^M$  i  $L^T$  są różne. Do obliczeń przyjęto średni zasięg oddziaływań wymiennych obliczony ze wzoru:  $L = c L^M + b L^T$ .

Do obliczenia remanencji magnezu może zostać zastosowane prawo Stonera-Wohlfartha obowiązujące dla izotropowego układu nieoddziałujących na siebie jednodomenowych cząstek magnetycznie twardych. Przy takich założeniach zachodzi zależność

$$J_r = J_s/2$$

gdzie:  $J_r$  - remanencja,  $J_s$  - namagnesowanie nasycenia.

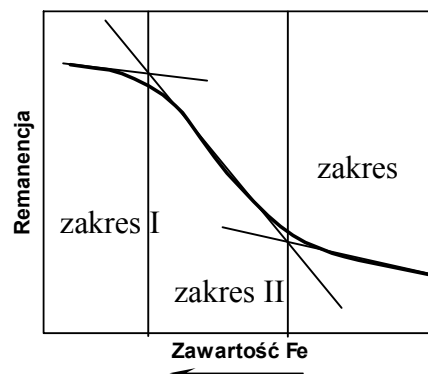
Obliczając remanencję takiego układu, sumowano 6 czynników

$$J_r = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 + J_6$$

- $J_1 = (1-c) J_s^T/2$  jest remanencją izotropowego układu ziaren fazy magnetycznie twardej, obliczoną z prawa Stonera-Wohlfartha,
- $J_2 = c J_s^M/2$  jest remanencją izotropowego układu ziaren fazy magnetycznie miękkiej, obliczoną z prawa Stonera-Wohlfartha,
- $J_3 = [(a + L)^3 - a^3]b J_s^M C^{T/T}/3a^3$  jest remanencją anizotropowego obszaru, w którym ziarna fazy magnetycznie twardej wymuszają orientację wektorów momentów magnetycznych atomów sąsiednich ziaren fazy magnetycznie twardej,
- $J_4 = [(a + L)^3 - a^3]b J_s^M C^{T/M}/3a^3$  jest remanencją anizotropowego obszaru, w którym ziarna fazy magnetycznie twardej wymuszają orientację wektorów momentów magnetycznych atomów sąsiednich ziaren fazy magnetycznie miękkiej,
- $J_5 = [(a + L)^3 - a^3]b J_s^T C^{T/T}/6a^3$  jest remanencją izotropowego obszaru, w którym ziarna fazy magnetycznie twardej wymuszają orientację wektorów momentów magnetycznych atomów sąsiednich ziaren fazy magnetycznie twardej, o który zmniejsza się czynnik  $J_1$  od izotropowego obszaru fazy magnetycznie twardej. Czynniki te mają znak (-),
- $J_6 = [(a + L)^3 - a^3]b J_s^M C^{T/M}/6a^3$  jest remanencją izotropowego obszaru, w którym ziarna fazy magnetycznie twardej wymuszają orientację wektorów momentów magnetycznych atomów sąsiednich ziaren fazy magnetycznie miękkiej, o który zmniejsza się czynnik  $J_2$  od izotropowego obszaru fazy magnetycznie miękkiej. Czynniki te mają znak (-).

Można ogólnie przyjąć, że w materiałach typu RE-M występuje faza magnetycznie twarda zawierająca  $x\%$  Fe, współistniejąca z innymi fazami. Przy zawartości Fe większej od  $x$  jest to faza Fe- $\alpha$ , a przy zawartości mniejszej od  $x$  jest to faza paramagnetyczna lub w przypadku

materiałów Sm-Fe-N mieszanina fazy paramagnetycznej i Fe. Zależność remanencji od zawartości Fe ( $J_r = F(x)$ ) ma charakter jak na rysunku 3. Jej przebieg można podzielić na 3 zakresy. Dla zawartości Fe mniejszej od zawartości stechiometrycznej w fazie magnetycznie twardej (zakres III)  $J_r$  rośnie wraz ze wzrostem zawartości Fe, ponieważ wzrasta udział fazy magnetycznie twardej oraz rośnie udział granic T/T, na których następuje podwyższenie remanencji. W zakresie II remanencja rośnie szybko wraz ze wzrostem zawartości Fe, ponieważ zwiększa się udział ziaren Fe o dużym namagnesowaniu nasycenia i dużym zasięgu oddziaływań wymiennych. Szybki wzrost remanencji związany jest z wymuszaniem ukierunkowania wektorów momentów magnetycznych atomów Fe w pobliżu granic T/M. W zakresie I przyrosty remanencji zmniejszają się wraz ze wzrostem zawartości Fe, ponieważ rośnie udział granic typu M/M, które nie mają wpływu na zjawisko podwyższenia remanencji.



Rys. 3. Przebieg zależności  $J_r = F(x)$  obliczony na podstawie modelu geometrycznego

Fig. 3.  $J_r = F(x)$  plot calculated on basis of the geometrical model

Opisany model ma charakter ogólny i przy zastosowaniu do konkretnego materiału magnetycznie twardego powinien być dopasowany do jego mikrostruktury. Konieczne jest uwzględnienie wszystkich faz występujących w znaczących ilościach, a także zanieczyszczeń pochodzących z procesu wytwarzania materiału.

Przy opracowaniu opisanego modelu przyjęto wiele uproszczeń i założeń. Miały one dwójaki charakter:

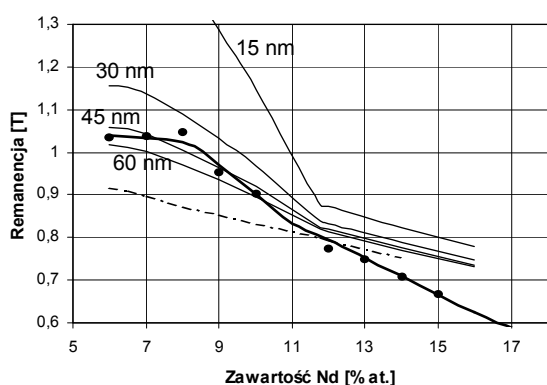
- dotyczyły uproszczeń mikrostruktury, takich jak sześcienny kształt i jednakowa wielkość ziaren, uproszczony sposób obliczania udziału granic międzyfazowych poszczególnego rodzaju, założenia istnienia struktury typu duplex oraz nieuwzględnienia ubytków pierwiastka RE spowodowanych utlenieniem,
- dotyczyły uproszczeń zjawisk fizycznych, takich jak zastosowania prawa Stonera-Wohlfartha dla fazy magnetycznie miękkiej i uśrednienie odległości korelacji dla występujących faz.

Pomimo tych uproszczeń prostota modelu i możliwość jego dostosowania do różnych materiałów magnetycznie twardych czyni z niego wygodne narzędzie do oceny wpływu mikrostruktury na remanencję.

### Ocena wpływu mikrostruktury na podwyższenie remanencji

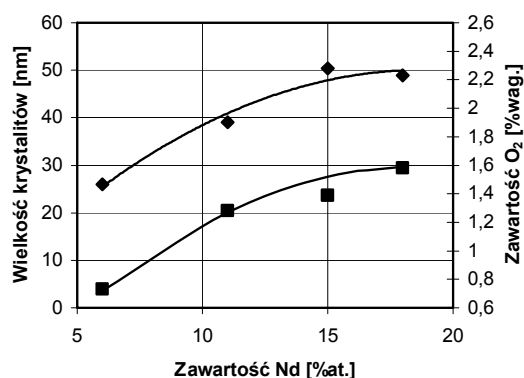
Do wytwarzania badanych materiałów zastosowano metodę mechanicznej syntezy [5]. Na proces składało się mielenie (90 h) proszków pierwiastków wchodzących w skład stopu oraz wyżarzanie ( $650^{\circ}\text{C}/0,5$  h dla Nd-Fe-B i  $690^{\circ}\text{C}/0,5$  h dla Sm-Fe-N).

Na podstawie analizy wyników obliczeń wynikających z geometrycznego modelu podwyższenia remanencji należy stwierdzić, że podstawowym parametrem decydującym o znaczeniu zjawiska jest wielkość ziarna (rys. 4).



Rys. 4. Porównanie zależności doświadczalnej  $B_r = f(\% \text{Nd})$  dla próbek otrzymanych metodą MA (gruba linia) z krzywymi obliczonymi dla różnej wielkości ziarna. Linia przerywaną zaznaczono krzywą obliczoną bez uwzględnienia oddziaływań wymiennych

Fig. 4. The comparison of experimental dependence  $B_r = f(\% \text{Nd})$  for samples obtained by MA (tick line) with dependencies calculated for different grain size on a basis of current model. Dashed line was plotted on the assumption of the equilibrium phase structure on a basis Stoner-Wohlfarth prediction



Rys. 5. Wpływ zawartości Nd na wielkość krystalitów fazy  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (♦) i zawartość tlenu (■)

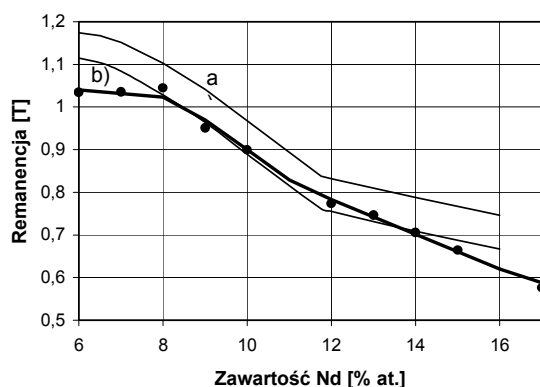
Fig. 5. Effect of Nd content on the grain size of  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (♦) phase and Nd content (■)

Przy zawartościach Nd nieco mniejszych (7÷10% Nd) od zawartości stechiometrycznej w fazie  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{N}$  model dobrze opisuje remanencję magnesów przy założeniu wielkości ziarna około 45 nm. Pomiary wielkości krystalitów w próbkach Nd-Fe-B otrzymanych metodą mechanicznej syntezy przeprowadzone metodą Schererra wykazały, że wielkość ziarna zależy od zawartości Nd (rys. 5). Stosując badania elektronomikroskopowe stwierdzono, że w materiałach o różnej zawartości Nd występują różne rozkłady wielkości ziarna (rys. 6a i 7). W próbkach stopu  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{88}\text{B}_6$  większość ziaren posiada wielkość z przedziału 20÷40 nm (wielkość średnia około 25 nm). Próbki stopu  $\text{Nd}_{18}\text{Fe}_{76}\text{B}_6$  były niejednorodne pod względem wielkości ziarna. Obserwowano obszary drobnoziarniste (25 nm) oraz obszary większych ziaren (80 nm) - rys. 7.

Rys. 7. Mikrostruktura materiału  $\text{Nd}_{18}\text{Fe}_7\text{B}_6$ : a) obszary o dużych ziarnach, b) obszary o małych ziarnachFig. 7. Microstructure of  $\text{Nd}_{18}\text{Fe}_7\text{B}_6$ : a) large grains area, b) fine grains area

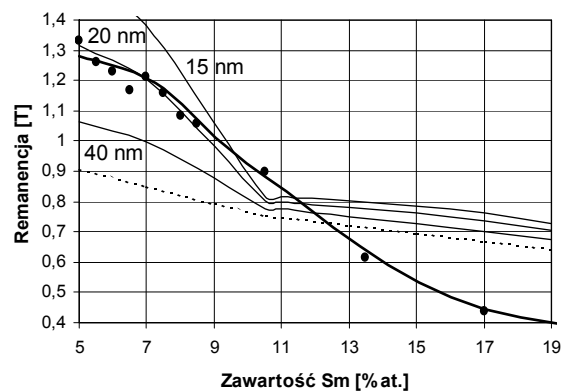
Ta niejednorodność odpowiada prawdopodobnie za obniżenie remanencji magnesu w stosunku do obliczonej na podstawie modelu. W próbce  $\text{Nd}_6\text{Fe}_{88}\text{B}_6$  obserwowano obecność pojedynczych bardzo dużych (200 nm) ziaren Fe (rys. 6b). Można sądzić, że przy dużej zawartości Fe istnieje tendencja do tworzenia dużych ziaren tego składnika, co sprawia, że udział granic pomiędzy fazą magnetycznie miękką i twardą jest mniejszy od przewidywanego. Tym można tłumaczyć uzyskanie niższych wartości remanencji niż obliczone na podstawie modelu dla zawartości Nd mniejszych od około 7,5%.

Zastanawiające jest uzyskanie znacznie mniejszych wartości remanencji dla próbek o zawartości Nd większej od stechiometrycznej zawartości w fazie  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Fakt ten można tłumaczyć istnieniem struktury szkieletowej, w której niemagnetyczna faza bogata w Nd wypełnia obszary granic ziaren i uniemożliwia oddziaływanie wymienne.

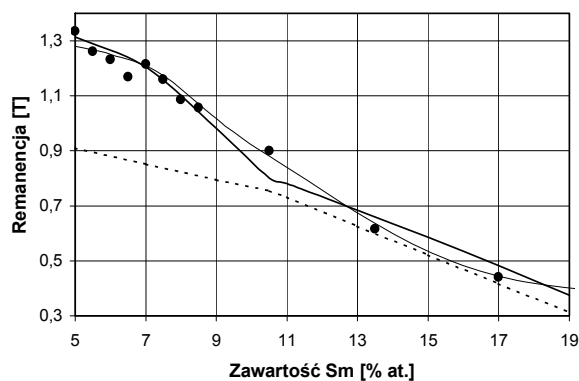
Rys. 8. Porównanie zależności doświadczalnej  $B_r = f(\% \text{Nd})$  - 0 gruba linia - z krzywymi modelowymi obliczonymi: a) bez uwzględnienia udziału tlenków, b) przy uwzględnieniu udziału tlenków obliczonego na podstawie pomiarów zawartości tlenu przedstawionych na rys. 5. Założona wielkość ziarna 30 nmFig. 8. The comparison of experimental dependence  $B_r = f(\% \text{Nd})$  (tick line) with dependencies calculated on a basis of current model:

a) without and b) with taking neodymium oxides into consideration (calculated on a basis fig. 5). Assumed grain size 30 nm

Czynnikiem, który sprawia, że w omawianym zakresie zawartości Nd rzeczywista remanencja jest niższa od obliczonej, jest obecność tlenków. Duża zawartość tlenu jest charakterystyczną cechą stopów Nd-Fe-B otrzymanych metodą mechanicznej syntezy. Zawartość ta jest tym większa, im większa jest zawartość Nd w stopie (rys. 5). Fakt występowania tlenków uwzględniono w modelu. Obliczoną remanencję pomniejszono o ułamek będący zawartością tlenków obliczoną na podstawie zmierzonej zawartości tlenu (rys. 5). Uwzględnienie tlenków sprawia, że wyniki doświadczalne bardzo dobrze odpowiadają obliczonym na podstawie modelu (rys. 8).

Rys. 9. Porównanie zależności doświadczalnej  $B_r = f(\% \text{Sm})$  dla próbek Sm-Fe-N otrzymanych metodą MA (gruba linia) z krzywymi modelowymi obliczonymi dla różnej wielkości ziarna. Linia przerywaną zaznaczono krzywą obliczoną bez uwzględniania oddziaływań wymiennychFig. 9. The comparison of experimental dependence  $B_r = f(\% \text{Sm})$  for samples obtained by MA (tick line) with dependencies calculated for different grain size on a basis of current model. Dashed line was plotted on the assumption of the equilibrium phase structure on a basis Stoner-Wohlfarth prediction

Zastosowanie modelu do obliczenia remanencji stopów Sm-Fe-N daje bardzo dobre rezultaty dla zawartości Sm mniejszej od zawartości stechiometrycznej w fazie  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ , tj. 10,5% (rys. 9) - dla materiałów o strukturze nanokompozytów. Najlepsze dopasowanie modelu do wyników doświadczalnych uzyskano przy założeniu wielkości ziarna 20 nm. W zakresie zawartości Sm większych od zawartości stechiometrycznej w fazie  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  wartości obliczone są wyższe od doświadczalnych. Na rysunku 10 przedstawiono krzywą modelową obliczoną przy założeniu, że wydzielienia Fe powstające w tym zakresie stężeń Sm nie mają wpływu na remanencję. Krzywa ta bardzo dobrze przybliża dane doświadczalne. Należy zatem przypuszczać, że wydzielienia Fe powstające na skutek rozkładu faz bogatych w Sm na Fe i paramagnetyczny SmN są na tyle izolowane przez fazę paramagnetyczną, że nie zachodzą oddziaływania wymienne z fazą  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ .



Rys.10. Porównanie zależności doświadczalnej  $B_r = f(\% \text{Sm})$  dla próbek Sm-Fe-N otrzymanych metodą MA (gruba linia) z krzywą obliczoną dla wielkości ziarna 20 nm. Nie uwzględniono działania wydzielen Fe powstających z rozkładu faz bogatych w Sm. Linia przerywaną zaznaczono krzywą obliczoną bez uwzględnienia oddziaływań wymiennych

Fig.10. The comparison of experimental dependence  $B_r = f(\% \text{Sm})$  for Sm-Fe-N samples obtained by MA (tick line) with dependence calculated on a basis of current model (for grain size 20 nm) without taking influence of Fe participations, obtained out of Sm-rich phases, into consideration. Dashed line was plotted on the assumption of the equilibrium phase structure on a basis Stoner-Wohlfarth prediction

## WNIOSKI

Porównanie wartości zmierzonych doświadczalnie z obliczonymi na podstawie modelu pozwala na sformułowanie kilku podstawowych wniosków dotyczących wpływu mikrostruktury na zjawisko podwyższonej remanencji.

1. Przy małych zawartościach metalu RE (dużym udziale fazy Fe) remanencja wzrasta w mniejszym stopniu niż można się spodziewać. Powodem tego jest najprawdopodobniej występowanie także dużych ziaren Fe, a więc znacznie mniejsza powierzchnia granic typu faza magnetycznie miękka/faza magnetycznie twarda.

2. Wartości remanencji zmierzone doświadczalnie są większe od obliczonych dla materiałów o składach bliskich składowi stechiometrycznemu fazy magnetycznie twardej (również powyżej tego składu). Wynika to z istnienia nierównowagowych wydzielen Fe dla zawartości pierwiastka RE większej od składu stechiometrycznego tej fazy. Obecność nierównowagowych wydzielen Fe została potwierdzona dla magnesów Nd-Fe-B [6] i Sm-Fe-N [7] wytwarzanych metodą MA.
3. W magnesach Nd-Fe-B wytwarzanych metodą MA dla zawartości Nd większych od zawartości stechiometrycznej w fazie  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  zmierzone doświadczalnie wartości remanencji są znacznie niższe od obliczonych. Powodem tego mogłoby być występowanie struktury szkieletowej z fazą paramagnetyczną rozmieszczoną wokół ziaren  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  (model zakłada istnienie struktury typu duplex). Innym powodem może być obniżenie remanencji spowodowane obecnością tlenków (ich udział rośnie wraz ze wzrostem zawartości pierwiastka RE).
4. Dla magnesów Sm-Fe-N wytwarzanych metodą MA uzyskano dobrą zgodność pomiędzy wynikami obliczonymi i doświadczalnymi w przypadku nieuwzględnienia wpływu na remanencję wydzielen Fe, powstających z rozpadu w czasie azotowania faz bogatych w Sm, dla zawartości Sm większych od stechiometrycznej zawartości w fazie magnetycznie twardej. Należy sądzić, że wydzielienia te są całkowicie izolowane magnetycznie paramagnetyczną fazą SmN.

Badania strukturalne materiałów pozwoliły na stwierdzenie, że podstawowym czynnikiem nieuwzględnionym w modelu jest nieregularność rozkładu wielkości ziarna (w tym obecność wydzielen fazy magnetycznie miękkiej o wymiarach zasadniczo różnych od wymiarów ziaren fazy magnetycznie twardej). Zaproponowany geometryczny model jest przydatny do opisu wpływu mikrostruktury na remanencję magnesów i stanowi wygodne narzędzie oceny wpływu elementów mikrostruktury na ten parametr.

Praca finansowana z grantu KBN nr PBZ/KBN/13/T08/99/24.

## LITERATURA

- [1] Kaszuwara W., Leonowicz M., Wojciechowski S., Kompozyty 2001, 1, 1, 3-6.
- [2] Schrefl T., Fidler J., Kronmuller H., Magn J., Magn. Mat. 1994, 137.
- [3] Kronmuller H., NanoStructured Materials 1995, 6, 157.
- [4] Stoner E.C., Wohlfarth W.P., Phil. Trans. Royal Soc. 1948, Londyn A240, 599.
- [5] Kaszuwara W., Archiwum Nauki o Materiałach (przyjęte do druku).

- [6] Pawlik K., Wysłocki J.J., Pawlik P., Olszewski J., Leonowicz M., Kaszuwara W., *Archiwum Nauki o Materiałach* 2001, 3, 179-189.
- [7] Januszewski D., *Rozprawa doktorska*, Wydział Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.

Recenzent  
Bogumił Węgliński