

СТЕПЕНЬ ДИСПЕРСНОСТИ И МЕХАНИЗМ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ (ПРИРОДА ГИСТЕРЕЗИСА) ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ ВЫСОКОАНИЗОТРОПНЫХ МАГНЕТИКОВ

Манаков Н.А., Чакак А.А.

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург

В работах [1-7] рассматривались процессы перемагничивания поликристаллических сплавов SmCo_5 и $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ с разной степенью дисперсности микроструктуры (аморфные, нанокристаллические, субмикроструктурные, микрокристаллические, мелкокристаллические). Было установлено, что они характеризуются разными механизмами лимитирующими процесс их перемагничивания, а также резко отличающимися значениями коэрцитивной силы (H_c), относительной остаточной намагниченности и других параметров гистерезиса. Различие гистерезисных свойств этих сплавов связывалось с разной степенью их дисперсности. Под лимитирующим механизмом понимается тот, который определяет значение коэрцитивной силы. Хотя в целом процесс перемагничивания может складываться из последовательности разных механизмов.

Для выяснения природы влияния размера кристаллитов на механизмы перемагничивания и параметры гистерезиса, а также распространения полученных ранее результатов на другие сплавы высокоанизотропных магнетиков необходимо учитывать не абсолютный, а «относительный» размер кристаллитов в сплаве, то есть соотношение среднего размера кристаллитов в сплаве с такими критическими параметрами, как толщина доменной границы, критический размер абсолютной однодоменности, критический размер однодоменности.

В таблице 1 приведены механизмы, определяющие процесс перемагничивания указанных выше групп сплавов и средний размер кристаллитов в сравнении с перечисленными выше критическими параметрами.

Но, как известно, гистерезис ферромагнетиков обусловлен образованием в них доменной структуры (ДС) [8,9]. Поэтому, прежде всего, необходимо уяснить влияние степени дисперсности на характер доменной структуры рассматриваемых сплавов. На рисунке 1 отражено изменение коэрцитивной силы, относительной остаточной намагниченности, размера доменов и характера ДС в зависимости от размера кристаллитов в структурно изотропном поликристаллическом сплаве SmCo_5 . Качественно аналогичный характер зависимостей представленных на рисунке 1 был выявлен и для некоторых других сплавов высокоанизотропных магнетиков ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, PrCo_5 , GdCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, TbFe_2 [1-7, 10-16]).

Таблица 1. Структурное состояние и механизм, лимитирующий процесс перемагничивания поликристаллических сплавов высокоанизотропных редкоземельных магнетиков

№ п/п	Структурное состояние сплава	Средний размер кристаллитов	Механизм лимитирующий процесс перемагничивания
1	аморфный		смещение доменных границ
2	нанокристаллический	$D \sim \delta \sim 5 \text{ нм}$	микромагнитный
3	субмикрокристаллический	$D \sim d_c \sim 10\delta$ $\delta < D < d_k$	неоднородное вращение намагниченности
4	микрокристаллический	$D \sim d_k \sim 1 \text{ мкм}$	зародышеобразование обратных доменов
5	мелкокристаллический	$D > 10 d_k$	смещение доменных границ

В таблице $\delta = \pi\sqrt{A/K}$ – толщина доменной границы, $d_c = 2,9\sqrt{A/M_s}$ – критический размер абсолютной однодоменности, $d_k = 1,4\gamma/M_s^2$ – критический размер однодоменности, $\gamma = \sqrt{AK}$ – поверхностная плотность энергии доменной границы, A – константа обменного взаимодействия, M_s – намагниченность насыщения, D – средний размер кристаллитов.

В нанокристаллическом сплаве размер кристаллитов близок к ширине доменной границы, поэтому энергетически выгодно образование так называемых «доменов обменного взаимодействия» [10], включающих достаточно большую группу кристаллитов (см. рисунок 1, схему 2). Общее направление намагниченности в домене определяется распределением осей легкого намагничивания (ОЛН) в кристаллитах, входящих в группу. Размер доменов может составлять $\sim 0,1 \text{--} 1,0 \text{ мкм}$.

В силу случайного распределения ОЛН кристаллитов домены обменного взаимодействия относительно неустойчивы и поэтому при включении внешнего магнитного поля происходит вращение намагниченности в отдельных кристаллитах к направлению поля, границы доменов при этом смещаются или разрушаются. Такой характер перемагничивания был назван «микромагнитным» [6]. Он приводит к относительно невысоким значениям коэрцитивной силы $\sim 10^5 \text{ А/м}$.

В субмикрокристаллическом сплаве благодаря более крупному размеру кристаллитов возрастает роль магнитокристаллической анизотропии и намагниченность в основной части каждого кристаллита устанавливается вдоль ОЛН, т.е. каждый кристаллит представляет отдельный домен (см. рисунок 1, схему 3).

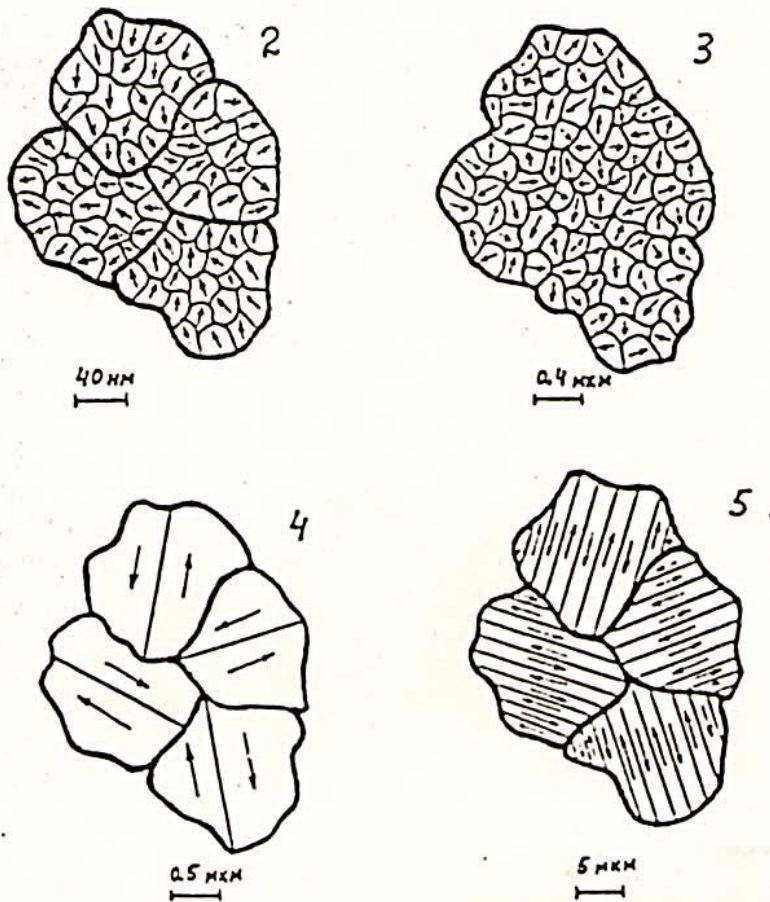
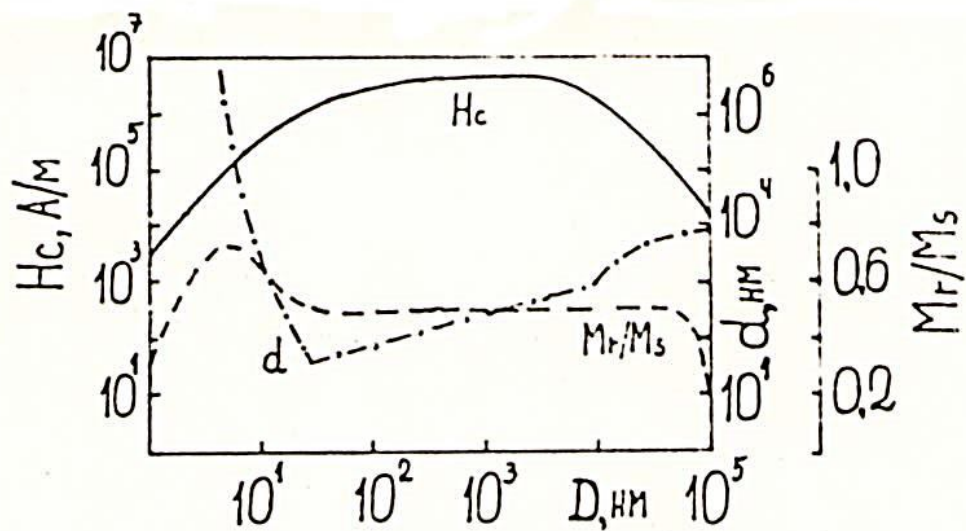


Рис. 1. Зависимость коэрцитивной силы (H_c —), относительной остаточной намагниченности (M_r/M_s - - -) и среднего размера доменов (d - · - ·) от степени дисперсности (размера кристаллитов D) структурно изотропных сплавов SmCo_5 , а также схематичное представление ДС разных групп сплавов (2÷4), представленных в таблице 1.

На границах между кристаллитами происходит переориентация магнитных моментов, то есть образуется нечто вроде доменной границы разной градусности в зависимости от ориентации ОЛН соседствующих кристаллитов. А поскольку размер кристаллитов близок к размеру абсолютной однодоменности, то они могут перемагничиваться только вращением намагниченности, точнее – неоднородным вращением намагниченности [2]. Такой механизм перемагничивания приводит к достаточно высоким значениям коэрцитивной силы $\sim 10^6$ А/м и более.

В микрокристаллическом сплаве размер кристаллитов близок к критическому размеру однодоменности, поэтому становится возможным процесс их перемагничивания путем зародышеобразования обратных доменов, т.е. возможно образование нескольких доменов в одном кристаллите (см. рисунок 1, схему 5).

Процесс зародышеобразования обратных доменов в таких высокоанизотропных магнетиках как SmCo_5 весьма затруднен, поэтому микрокристаллические сплавы обладают высокой коэрцитивной силой $\sim 5 \cdot 10^6$ А/м.

В мелкокристаллическом сплаве размер кристаллитов уже достаточно большой для формирования многодоменной структуры на каждом кристаллите (см. рисунок 1, схему 4). Процесс их перемагничивания определяется относительно легким смещением доменных границ, что характеризуется меньшими значениями коэрцитивной силы $\sim 10^5$ А/м.

У соединений $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и PrCo_5 толщина доменных границ примерно в два раза больше чем у SmCo_5 (см. таблицу 2), поэтому область микромагнитного механизма перемагничивания расширяется в сторону больших значений D . В то же время значения d_k у этих соединений меньше, чем у SmCo_5 , следовательно, область механизма перемагничивания смещением доменных границ расширяется в сторону меньших значений D . Поэтому у сплавов $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ и PrCo_5 наблюдается более узкий максимум на зависимости коэрцитивной силы от размера кристаллитов.

У соединения GdCo_5 значения δ и d_k больше, чем у SmCo_5 , что приводит к смещению максимума на зависимости $H_c(D)$ в сторону больших значений D .

Таблица 2. Значения критических магнитных параметров некоторых высокоанизотропных интерметаллических соединений [6,7,11]

Соединение	δ , нм	d_c , нм	d_k , мкм
SmCo_5	2,56	35	1,00
$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	6,50	35	0,40
PrCo_5	4,00	31	0,53
$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	5,40	30	0,40
GdCo_5	5,44	127	5,00

Таким образом, можно заключить, что максимальные значения коэрцитивной силы можно реализовать на дисперсных сплавах высокоанизотропных магнетиков при размерах кристаллитов $d_c \leq D \leq d_k$,

$D \geq 10\delta$ при условии, что энергия магнитокристаллической анизотропии сплава много больше энергии магнитоэлектростатического взаимодействия.

Список литературы

1. Манаков, Н.А. Степень дисперсности и магнитные свойства микрокристаллических сплавов высокоанизотропных магнетиков / Н.А. Манаков // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1990. - № 10. – с. 39-40.
2. Манаков, Н.А. О возможности перемагничивания сплавов типа $SmCo_5$ неоднородным вращением намагниченности / Н.А. Манаков // ФММ. – 1990. - № 12. – с. 67-71.
3. Манаков, Н.А. О механизме перемагничивания микрокристаллических сплавов $NdFeB$ / Н.А. Манаков, Г.Ф. Корзникова, Х.Я. Мулюков, В.В. Столяров, В.В. Толмачев // ФММ. – 1991. - № 1. – с. 197-199.
4. Манаков, Н.А. Дисперсность микроструктуры и гистерезисные свойства быстрозакаленных сплавов $FeNdB$ / Н.А. Манаков, Г.Ф. Корзникова, В.В. Столяров, В.В. Толмачев // ФММ. – 1991. - № 6. – с. 109-113.
5. Манаков, Н.А. Механизм высококоэрцитивного состояния дисперсных редкоземельных магнетиков / Н.А. Манаков, Ю.Г. Пастушенков. - Тверь: Изд-во Твер. ун-та, 1992. – 43 с.
6. Манаков, Н.А. Доменная структура и гистерезисные свойства мелкозернистых сплавов высокоанизотропных редкоземельных магнетиков / Н.А. Манаков, Г.Ф. Корзникова, В.В. Столяров // ФММ. – 1992. - № 2. – с. 21-26.
7. Манаков, Н.А. Процессы перемагничивания быстрозакаленных сплавов высокоанизотропных редкоземельных магнетиков: автореферат дисс. на соискание учен. степ. д.ф.-м.н.; институт физики металлов УрО РАН — Екатеринбург, 1994. - 38 с.
8. Вонсовский, С.В. Ферромагнетизм / С.В. Вонсовский, Я.С. Шур. – Москва-Ленинград: ОГИЗ, гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1948. – 816 с.
9. Вонсовский, С.В. Магнетизм / С.В. Вонсовский. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
10. Манаков, Н.А. Особенности процесса перемагничивания нанокристаллических сплавов высокоанизотропных магнетиков / Н.А. Манаков, М.В. Плетнева, А.А. Чакак; ГОУ «Оренбургский госуниверситет» - Оренбург, 2008. 5 с. ил. – Библиогр.. 7 назв. – Рус. Деп. В ВИНТИ 24.10.08, № 815-B2008.
11. Белоцерковский, А.В. Микромагнитная структура и процессы перемагничивания магнитно-твердых материалов / А.В. Белоцерковский, Н.А. Манаков, Ю.Г. Пастушенков, Ю.М. Смирнов. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – 240 с.
12. Любушкин, В.А. Гистерезисные свойства и механизм перемагничивания поликристаллических пленок $PrCo_5$ / В.А. Любушкин, Н.А. Манаков // Металлофизика. – 1991. – Т. 13, № 2. – с. 111-114.

13. Манаков, Н.А. Дисперсность микроструктуры и гистерезисные свойства сплавов высокоанизотропных редкоземельных магнетиков / Н.А. Манаков, В.Б. Вакуленко // ФММ. – 1997. – Т. 84, вып. 1. – с. 52-54.
14. Апханов, В.Б. Особенности перемагничивания поликристаллических пленок TbFe₂ / В.Б. Апханов, С.П. Жерихов, Н.А. Манаков, Г.И. Руссов // ФММ. – 1987. – Т. 63, вып. 1. – с. 199-202.
15. Манаков, Н.А. Магнитные свойства быстрозакаленного сплава GdCo₅ / Н.А. Манаков, Е.В. Иванова, К.С. Сахаев // Физика магнитных материалов. - Калинин: Изд-во Калинин. ун-та, 1983. – с. 72-76.
16. Манаков, Н.А. О природе коэрцитивной силы быстрозакаленных сплавов SmFe₂ / Н.А. Манаков, В.В. Толмачев, К.С. Сахаев // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. - № 6. – с. 85-87.