

ВЫСОКОАНИЗОТРОПНЫЕ МАГНЕТИКИ $Nd_{5-x}Fe_{25+3x}B_3$ И НОВЫЕ МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

А.В.Дерягин, Е.Н.Тарасов, А.В.Андреев,
В.Н.Москалев, А.И.Козлов

Впервые сообщаются основные магнитные и структурные характеристики монокристаллов соединения $Nd_5Fe_{25}B_3$. На основе этого соединения получены постоянные магниты с высокой магнитной энергией.

В¹ сообщалось о получении тонкой ленты путем быстрой закалки расплава Nd – Fe – В на вращающийся диск и спрессованных из нее образцов постоянных магнитов с коэрцитивной силой $H_c = 15$ кЭ и максимальным энергетическим произведением $(BH)_m = 14,1$ МГс·Э¹). В данной работе впервые получены монокристаллы соединения $Nd_5Fe_{25}B_3$, являющегося основной фазой в новых постоянных магнитах. Приведены магнитные характеристики монокристаллов и спеченных магнитов с величиной $(BH)_m$ свыше 30 МГс·Э.

¹) Следует отметить, что первое сообщение о высокой H_c сплава Nd – Fe было сделано советскими учеными Р.И.Янусом и В.И.Дрожжиной еще в 1935 г. ².

Сплавы Nd(99,8) – Fe(99,9) – В(99,6) различного химсостава выплавлялись в индукционной печи в атмосфере гелия. На основании рентгенографического и металлографического анализа установлено, что практически однофазному состоянию соответствуют сплавы с общей формулой $Nd_{5-x}Fe_{2,5+3x}B_3$ ($0 \leq x \leq 1$). Соединения в этой области составов имеют тетрагональную кристаллическую решетку, параметры которой слабо зависят от x ($a = 8,80 \text{ \AA}$, $c = 12,20 \text{ \AA}$ при $x = 0$ и $a = 8,81 \text{ \AA}$, $c = 12,19 \text{ \AA}$ при $x = 1$). Лауэграммы монокристаллов относятся к лауэ-классу $4/mmm$. В элементарной ячейке содержатся две формульных-единицы. Рассчитанная из этих данных рентгеновская плотность ($\rho = 7,56 \text{ г/см}^3$ при $x = 0$ и $7,63 \text{ г/см}^3$ при $x = 1$) хорошо совпадает с измеренной гидростатическим взвешиванием. Установлено также существование изоструктурного соединения $Y_5Fe_{2,5}B_3$ с немагнитным Y ($a = 8,74 \text{ \AA}$, $c = 12,05 \text{ \AA}$). В сплаве $Nd_5Fe_{2,5}B_3$ ($x = 0$) удалось выделить зерна, из которых получены монокристаллические образцы для проведения магнитных и рентгенографических исследований в интервале температур 4,2 – 800К.

На рис. 1 приведены температурные зависимости удельной намагниченности σ вдоль оси c , поля магнитной анизотропии $H_a = 2K_1/\sigma_s$ (K_1 – первая константа анизотропии, σ_s – спонтанная удельная намагниченность), определенного из кривых $\sigma(H)$ вдоль и поперек оси c в полях до 25 кЭ и угла θ между осью c и осью легкого намагничивания (ОЛН). Угол θ определялся из кривых вращающих моментов. Видно, что при уменьшении температуры от $T_c = 600\text{К}$ до $T_s = 140\text{К}$ величина σ вдоль оси c монотонно увеличивается. В этой области температур соединение является магнитоодноосным (ОЛН $\parallel c$) и $\sigma = \sigma_s$. Ниже T_s σ уменьшается, что вызвано отклонением ОЛН от оси c на угол θ , который при $T = 4,2\text{К}$ составляет 33° . Как видно из зависимости $H_a(T)$, K_1 при T_s меняет знак. Анализ кривых намагничивания в трудном направлении показывает, что K_2 в $Nd_5Fe_{2,5}B_3$ положительна. Такое сочетание констант анизотропии (K_1 меняет знак, $K_2 > 0$) должно приводить к спиноориентационному фазовому переходу второго рода³, что и наблюдается в эксперименте. Ниже T_s , кроме того, появляется заметная анизотропия в базисной плоскости кристалла.

Соединение $Y_5Fe_{2,5}B_3$, в котором анизотропия обусловлена только Fe, также является одноосным с величиной $H_a \approx 30 \text{ кЭ}$ при комнатной температуре. Столь высокая анизотропия Fe-подрешетки, по-видимому, связана с частичным размораживанием орбитального момента Fe. Сопоставление с величиной $H_a = 74 \text{ кЭ}$ в $Nd_5Fe_{2,5}B_3$ показывает, что при комнатной температуре обе магнитные подрешетки (Nd и Fe) имеют один знак K_1 . Поэтому ориентационный переход нельзя объяснить конкуренцией анизотропии Nd- и Fe-подсистем. По-видимому, магнитная анизотропия ионов Nd в неэквивалентных кристаллографических позициях имеет разные знаки и температурные зависимости, и при низких температурах становится существенным вклад от ионов Nd с "плоскостной" анизотропией.

В $Nd_5Fe_{2,5}B_3$, как и в других (4f-Fe)-интерметаллидах с легкими РЗМ, магнитный момент ионов Nd параллелен μ_{Fe} . Если считать, что ионы Nd находятся в состоянии Nd^{3+} и $\mu_{Nd} = 3,28 \mu_B$, то из σ_s при $T \rightarrow 0$ получим $\mu_{Fe} = 1,9 \mu_B$, что близко к значению μ_{Fe} в $Y_5Fe_{2,5}B_3$, $R_2Fe_{1,7}$ и чистом Fe ($2,0 - 2,2 \mu_B$). Как показали измерения температурной зависимости параметров решетки, большая величина μ_{Fe} в $Nd_5Fe_{2,5}B_3$ приводит к сильным спонтанным деформациям кристалла при магнитном упорядочении. Тепловое расширение ниже T_c имеет инвариный характер, особенно резко выраженный в базисной плоскости. Спонтанная объемная магнитострикция ω_s , определенная из разности между экспериментальным и экстраполированным из парамагнитной области значениями объема элементарной ячейки, при $T = 4,2\text{К}$ достигает гигантской величины ($+2 \cdot 10^{-2}$), что почти в два раза превышает максимальное значение ω_s в R – Fe-соединениях ($1,2 \cdot 10^{-2}$ в $R_2Fe_{1,7}$). Спиновая переориентация также сопровождается большим объемным эффектом ($\Delta\omega_s = -1 \cdot 10^{-3}$) – сжатием решетки по всем направлениям, что по-видимому, обусловлено уменьшением μ_{Fe} при отклонении ОЛН от оси c .

Соединение $Nd_5Fe_{2,5}B_3$ при комнатной температуре имеет очень удачное сочетание фундаментальных магнитных характеристик $4\pi M_s = 14 \text{ кГс}$, $H_a = 74 \text{ кЭ}$ и теоретического пре-

дела $(BH)_{mt} = 49 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$ для получения на его основе высокоэнергетических постоянных магнитов. Для этого указанный сплав измельчался, прессовался в магнитном поле, спекался и подвергался дополнительному отжигу. На рис. 2 приведены спинки петли гистерезиса полученного магнита, а на рис. 1 — температурные зависимости его H_c , остаточной индукции $4\pi M_r$ и $(BH)_m$. При комнатной температуре магнит имеет $H_c = 9,3 \text{ кЭ}$, $B^H_c = 8,2 \text{ кЭ}$, $4\pi M_r = 11,8 \text{ кГс}$, $\rho = 7,2 \text{ г/см}^3$ и $(BH)_m = 31 \text{ МГс} \cdot \text{Э}^2$. Сравнение начальной кривой намагничивания и нисходящей ветви петли гистерезиса позволяет сделать заключение, что высокая H_c магнита вызвана затруднением возникновения и развития доменной структуры при перемагничивании. Значения $(BH)_m$ новых магнитотвердых материалов из сплавов Nd — Fe — В выше, чем у SmCo_5 и $\text{Sm} - \text{Co} - \text{Fe} - \text{Cu} - \text{Zr}$, при этом они не содержат дефицитных и дорогостоящих Sm и Co. Есть основания полагать, что Nd в этих магнитах может быть заменен другими легкими РЗМ, в частности, празеодимом и даже дешевым цериевым мышьяк-галлом.

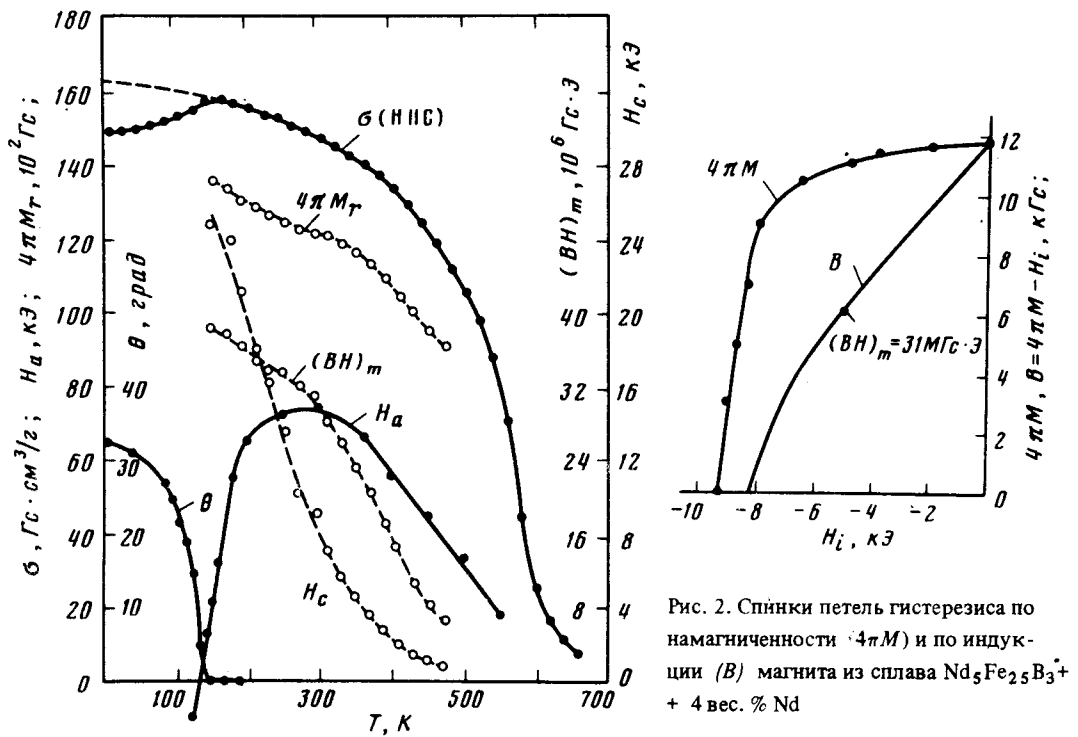


Рис. 1. Температурные зависимости удельной намагниченности σ в поле $H = 20 \text{ кЭ}$ вдоль оси c , поля магнитной анизотропии H_a , угла θ между осью c и ОЛН монокристаллов $\text{Nd}_5\text{Fe}_{25}\text{B}_3$ и коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции $4\pi M_r$, максимального энергетического произведения $(BH)_m$ магнита из сплава $\text{Nd}_5\text{Fe}_{25}\text{B}_3 + 4 \text{ вес. \% Nd}$

Анализ полученных результатов показывает, что приведенные здесь и в ⁴ характеристики магнитов могут быть существенно улучшены ($BH_m \geq 40 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$) при дальнейшей оптимизации технологических параметров и химического состава исходного сплава. Относительно высокий ($0,08 \text{ \% K}^{-1}$) температурный коэффициент остаточной индукции может быть

²) Когда данная статья готовилась к публикации, вышла работа ⁴, где по такой же технологии на основе $\text{Nd}_5\text{Fe}_{25}\text{B}_3$ получены магниты с $(BH)_m = 36 \text{ МГс} \cdot \text{Э}$. Более высокие свойства определяются лучшими условиями текстурирования и прессования порошка, в результате чего в ⁴ достигнуты значения $\rho = 7,4 \text{ г/см}^3$ и $4\pi M_r = 12,3 \text{ кГс}$. Технология получения магнитов описана в ⁴ достаточно подробно, поэтому мы ограничились здесь только перечислением операций.

понижен при частичной замене Nd или других легких РЗМ тяжелыми РЗМ, а также легированием сплава компонентами, повышающими T_c . Можно с уверенностью утверждать, что новые постоянные магниты из сплавов РЗМ — Fe — В являются перспективными и найдут самое широкое применение в различных областях техники.

Авторы благодарят К.П.Белова и Р.З.Левитина за плодотворное сотрудничество и обсуждение результатов исследований, В.Н.Бекетова и С.В.Терентьева за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. *Croat J.J., Herbst J.F., Lee R.W., Pinkerton F.E.* Appl. Phys. Lett., 1984, **44**, 148.
2. *Янус Р.И., Дрожжина В.И.* Nature, 1935, **36**, 175.
3. *Белов К.П., Звездин А.К., Кадомцева А.М., Левитин Р.З.* УФН, 1976, **119**, 447.
4. *Sagawa M., Fujimura S., Togawa N., Yamamoto H., Matsuura Y.* J. Appl. Phys., 1984, **55**, 2083.

Уральский
государственный университет им. А.М.Горького

Поступила в редакцию
23 апреля 1984 г.