

Научная статья

УДК 621.318.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68

ВКЛАД ФАЗ В НАМАГНИЧЕННОСТЬ СПЕЧЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ Nd–Dy–Fe–Co–B

Р.А. Валеев¹, Д.В. Королев¹, Р.Б. Моргунов¹, В.П. Пискорский¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Необходимость изготовления постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов сложной формы, обладающих повышенной термостабильностью магнитных свойств заставляет использовать в химическом составе сплава тяжелый редкоземельный металл диспрозий и переходный металл кобальт. В связи с этим изменяется фазовый состав материала постоянного магнита. Исследование магнитных свойств второстепенных фаз и их вклад в магнитные свойства постоянных магнитов необходимо для поиска оптимального состава, позволяющего получать постоянные магниты с заданным уровнем свойств.

Ключевые слова: редкоземельные магниты, основная магнитная фаза, остаточная индукция, коэрцитивная сила, легирование кобальтом, второстепенные фазы

Для цитирования: Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Пискорский В.П. Вклад фаз в намагниченность спеченных материалов Nd–Dy–Fe–Co–B // Труды ВИАМ. 2022. № 11 (117). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.

Scientific article

THE CONTRIBUTION OF PHASES TO THE MAGNETIZATION OF SINTERED MATERIALS Nd–Dy–Fe–Co–B

R.A. Valeev¹, D.V. Korolev¹, R.B. Morgunov¹, V.P. Piskorsky¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. The need to manufacture permanent magnets based on rare-earth metals of complex shape and with increased thermal stability of magnetic properties forces the use of heavy rare-earth metal dysprosium and transition metal cobalt in the chemical composition of the alloy. In this regard, the phase composition of the permanent magnet material changes. The study of the magnetic properties of secondary phases and their contribution to the magnetic properties of permanent magnets is necessary to find the optimal composition that allows to obtain permanent magnets with the necessary level of properties.

Keywords: rare earth magnets, main magnetic phase, residual induction, coercive force, cobalt alloying, secondary phases

For citation: Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Piskorsky V.P. The contribution of phases to the magnetization of sintered materials Nd–Dy–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2022, no. 11 (117), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-11-60-68.

Введение

В приборостроении важной характеристикой является термостабильность материала. Точность для навигационного прибора определяет температурная зависимость крутизны характеристики по току (K_T), которая зависит исключительно от максимального изменения индукции ΔB материала магнита в заданном температурном диапазоне.

Исследования магнитных систем РЗМ–Fe–Co–В (где РЗМ – редкоземельный металл), проведенные в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, показали, что при использовании магнитного материала этой системы для создания магнитов возможно получить в диапазоне температур от –60 до +80 °С значение температурного коэффициента индукции (ТКИ), близкое к 0 %/°С. Данные магнитные материалы находят свое применение при создании постоянных кольцевых магнитов с радиальной текстурой для динамически настраиваемых гироскопов (ДНГ) и магнитов для акселерометров, что позволяет повысить их точность, надежность и технологичность.

Развитие микроэлектроники и микроэлектромеханических систем позволяет создать приборы меньших габаритов с меньшим энергопотреблением и лучшей энергоэффективностью. Традиционно в датчиках момента ДНГ применяют кольцевые магниты с радиальной текстурой, геометрические размеры которых зависят от конструкции ДНГ. Для современных навигационных приборов, в частности для ДНГ, требуются магнитотвердые материалы с минимальным изменением намагниченности в зависимости от температуры и с достаточно большими значениями намагниченности насыщения и коэрцитивной силы по намагниченности (H_{ct}) [1]. Это позволило бы иметь одинаковую электродвижущую силу (ЭДС) индукции в катушках при быстром вращении ротора гироскопа в широком температурном диапазоне, а также достаточно высокое значение этой ЭДС, что обеспечивается высокими значениями намагниченности и коэрцитивной силы. Часто получается так, что температурно-стабильные магниты имеют невысокие значения коэрцитивной силы по намагниченности (например, сплавы ЮНДК), а те, которые сохраняют значительную величину H_{ct} , проявляют ее сильную зависимость от температуры (например, сплав SmCo). На решение этого противоречия направлена данная работа.

Еще одно требование к специальным постоянным магнитам заключается в том, что оптимальной геометрической формой для ДНГ являются кольцевые магниты с радиальной текстурой [2, 3], которые могут быть изготовлены из материала системы Nd–Fe–В, но для повышения их температурной стабильности его необходимо легировать диспрозием и кобальтом [4]. Однако при таком легировании материал относится к фазовой диаграмме Nd–Co–В, а при выплавке сплава в результате кристаллизации образуется значительное количество слабомагнитных фаз, таких как: $RF_4В$ и RF_3 (где R – редкоземельный(е) металл(ы); F: Fe + Co) [5]. Поскольку основной магнитной фазой является фаза $R_2F_{14}В$, то появление в материале магнита любых других посторонних фаз ухудшает его параметры, уменьшая остаточную намагниченность и коэрцитивную силу.

В зависимости от содержания кобальта в спеченном материале (Nd, Dy)–(Fe_{1-y}Co_y)–В в наиболее интересной области концентраций ($y = 0,30–0,34$) с точки зрения температурной стабильности, объемная доля фазы $RF_4В$ может достигать до 36 % (объемн.), а фазы RF_3 – до 25 % (объемн.) [4].

Безусловно, такая высокая концентрация этих фаз должна оказывать влияние на температурную зависимость намагниченности, которая будет определяться не только основной магнитной фазой $R_2F_{14}В$. Этот вопрос в научно-технической литературе освещен довольно слабо, а основная масса работ, особенно по соединению $RF_4В$, касается лишь получения и обсуждения спектров Мёссбауэра и рентгеновской дифракции [6, 7]. Данные о статических магнитных свойствах упомянутых систем и их отдельных компонентах в такой литературе практически отсутствуют либо касаются составов, не имеющих отношения к рассматриваемым материалам [8].

Цель данной работы – экспериментальное исследование магнитных свойств соединений $RF_4В$ и RF_3 , близких по составу к фазам, обнаруженным в соединениях системы Nd–Dy–Fe–Co–В с высоким содержанием кобальта.

Отметим еще один прикладной аспект представленной работы. Для того чтобы поддерживать устойчивые поставки возобновляемых металлов и уменьшить воздействие на окружающую среду, вызванное добычей РЗМ, переработка лома магнитов NdFeB имеет решающее значение. Переработка отходов выгодна с точки зрения затрат энергии, по сравнению с получением чистых редкоземельных элементов из природных ресурсов. Один из потенциальных путей промышленной переработки – селективное извлечение РЗМ из магнитного лома с использованием расплавленного металла. Разработка процесса переработки требует точных термодинамических соотношений элементов для понимания системы Nd–Fe–B–Dy. Критические оценки и оптимизация всех доступных экспериментальных термодинамических свойств, данные фазовой диаграммы в бинарных подсистемах Dy–B и Dy–Nd, тройных подсистемах Dy–Fe–B, Dy–Nd–Fe и Dy–Nd–B и четверных системах Dy–Nd–Fe–B, где ранее получены параметры модели для описания энергии Гиббса всех фаз в системе, могут использоваться для моделирования вышеуказанного процесса. В частности, энергия Гиббса жидкости и в фазе твердого раствора описывается модифицированной квазихимической моделью с учетом ближнего порядка в жидком состоянии. Методом оценки, учитывающим кристаллическую структуру материала $\text{Fe}_{14}(\text{Nd}, \text{Dy})_2\text{B}$, а также его магнитную структуру были надежно предсказаны характеристики материала.

С помощью термодинамической базы данных FTlite из программного обеспечения FactSage можно выполнить комплексный термодинамический анализ и моделирование для процессов селективной экстракции и вакуумной очистки Nd и Dy из лома магнитов NdFeB с использованием расплава. Моделирование процесса может обеспечить для него идеальные условия (температура, отношение доли твердого состояния к жидкому металлу, давление, потребность в количестве тепла и т. д.) для переработки магнитного лома NdFeB.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 11.1. «Термостабильные магнитотвердые материалы и математические модели расчета их температурных характеристик для навигационных приборов нового поколения» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [9–13].

Материалы и методы

Сплавы выплавляли в дуговой печи в среде аргона. Исследованные сплавы имели следующий состав (здесь и далее – в % (атомн.)): образец 1 (фаза RF_4B) – $(\text{Nd}_{0,33}\text{Dy}_{0,67})(\text{Fe}_{0,60}\text{Co}_{0,40})_4\text{B}$; образец 2 (фаза RF_3) – $(\text{Nd}_{0,90}\text{Dy}_{0,10})(\text{Fe}_{0,61}\text{Co}_{0,39})_3$. Для выравнивания гомогенизации состава в разных частях слитка сплавы отжигали в вакуумной печи СНВЭ 1.3.1/16ИЗ в вакууме 10^{-3} Па при температуре 900 °С в течение 20 ч. Образцам придавали сферическую форму, поскольку только для этой формы точно известна величина однородного размагничивающего поля. Они не были текстурированными и могли рассматриваться как изотропные. Измерения проводили на вибрационном магнитометре в области температур 4,2–600 К и магнитном поле напряженностью – до 2400 кА/м. Параметры решетки определяли на рентгеновской установке ДРОН-3М на порошковых образцах с использованием трубки с излучением $\text{Fe } K_\alpha$ (длина волны 0,17889 нм). Параметры решетки для образца 1: $a = 0,504$ нм, $c = 0,686$ нм; для образца 2: $a = 0,514$ нм, $c = 2,461$ нм; плотность составила соответственно 8260 и 8080 кг/м³. Эти параметры соответствуют данным, приведенным в статьях [14, 15], других фаз не обнаружено. С помощью электронно-зондового микроанализа (ЭЗМА) обнаружено, что образцы являются однофазными. Определение локального химического состава образцов (с локальностью 1 мкм² и глубиной 1 мкм) проведено методами качественно-

го и количественного ЭЗМА на растровом электронном микроскопе EVOMA 10, оснащённом энергодисперсионным спектрометром X-Max, с применением калибровки по сертифицированным эталонам.

Результаты и обсуждение

Температурные зависимости намагниченности материалов образцов 1 и 2 представлены на рис. 1 и 2. Измерения проводили в магнитном поле напряженностью 800 и 2400 кА/м.

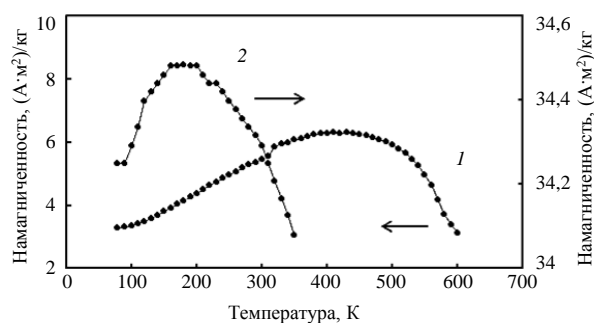


Рис. 1. Температурная зависимость намагниченности материалов $(\text{Nd}_{0,33}\text{Dy}_{0,67})(\text{Fe}_{0,60}\text{Co}_{0,40})_4\text{B}$ (1) и $(\text{Nd}_{0,90}\text{Dy}_{0,10})(\text{Fe}_{0,61}\text{Co}_{0,39})_3$ (2), измеренная в поле напряженностью 800 кА/м

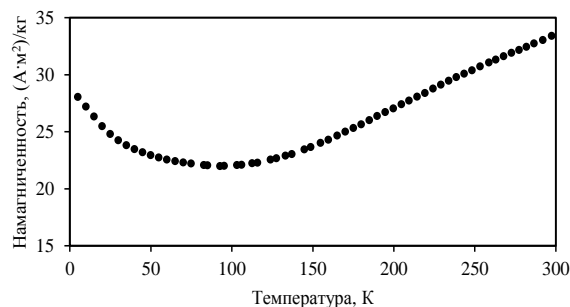


Рис. 2. Температурная зависимость намагниченности образца $(\text{Nd}_{0,33}\text{Dy}_{0,67})(\text{Fe}_{0,60}\text{Co}_{0,40})_4\text{B}$, измеренная в поле напряженностью 2400 кА/м

Как видно из данных рис. 1, максимальная намагниченность материала $(\text{Nd}_{0,33}\text{Dy}_{0,67})(\text{Fe}_{0,60}\text{Co}_{0,40})_4\text{B}$ составляет $6 \text{ (A}\cdot\text{m}^2\text{)/кг}$, а аналогичная характеристика для материала $(\text{Nd}_{0,90}\text{Dy}_{0,10})(\text{Fe}_{0,61}\text{Co}_{0,39})_3$ имеет значение $34,5 \text{ (A}\cdot\text{m}^2\text{)/кг}$. По кривым намагничивания установлено, что в этом поле образцы намагничены до насыщения как при температуре 80 К, так и при 350 К, а коэрцитивная сила не превышала 20 кА/м.

На рис. 2 представлена температурная зависимость намагниченности материала $(\text{Nd}_{0,33}\text{Dy}_{0,67})(\text{Fe}_{0,60}\text{Co}_{0,40})_4\text{B}$ (образец 1), измеренная в поле напряженностью 2400 кА/м. Измерения проводили на магнитометре, входящем в состав комплекса РРMS-9 со сверхпроводящим соленоидом, в области температур 4,2–300 К. Величина намагниченности образца 1 при температуре 290 К составила $33 \text{ (A}\cdot\text{m}^2\text{)/кг}$.

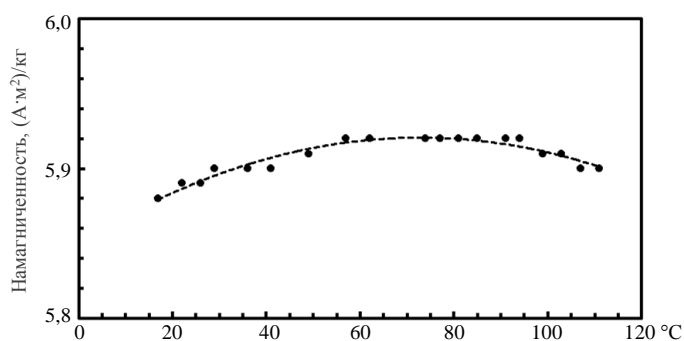


Рис. 3. Зависимость намагниченности в рабочей точке от температуры спеченного материала $(\text{Nd}_{0,29}\text{Dy}_{0,71})_{14,6}(\text{Fe}_{0,66}\text{Co}_{0,34})_{77,4}\text{B}_{8,03}$

На рис. 3 представлена температурная зависимость намагниченности спеченного постоянного магнита из материала состава $(\text{Nd}_{0,29}\text{Dy}_{0,71})_{14,64}(\text{Fe}_{0,66}\text{Co}_{0,34})_{77,34}\text{B}_{8,03}$, в котором методом ЭЗМА обнаружены фазы RF_4B и RF_3 . Измерения проводили с помощью

катушек Гельмгольца в области температур 13–100 °С. Величина температурного коэффициента индукции (ТКИ) в этом температурном диапазоне составила 0,008 %/°С. Измерение ТКИ проводили следующим образом. Для того чтобы исключить влияние необратимых потерь, образец нагревали в течение 2 ч до температуры 100 °С, выдерживали при этой температуре 20 мин и далее при охлаждении измеряли величину ТКИ. Как видно из данных рис. 3, температурное поведение намагниченности имеет нелинейный характер с максимумом при температуре 70 °С. Максимальное значение намагниченности (намагниченность насыщения) изотропного материала $(Nd_{0,33}Dy_{0,67})(Fe_{0,60}Co_{0,40})_4B$ (образец 1) при 20°С составляет 30,3 (А·м²)/кг, а для материала $(Nd_{0,90}Dy_{0,10})(Fe_{0,61}Co_{0,39})_3$ (образец 2) равна 84,0 (А·м²)/кг.

Рабочий температурный диапазон постоянных магнитов из материала системы (Nd, Dy)–(Fe, Co)–В составляет от –60 до +100 °С. Исходя из полученных данных, представленных на рис. 1, наибольший вклад в температурную зависимость спеченных магнитов данного состава вносит фаза RF₄B, поэтому был проведен ЭЗМА спеченных магнитов материала системы (Nd, Dy)–(Fe, Co)_y–В с различным содержанием кобальта в составе материала. На рис. 4 представлено объемное содержание фазы 1-4-1 и основной магнитной фазы 2-14-1 в спеченном материале системы (Nd, Dy)–(Fe, Co)_y–В в зависимости от содержания кобальта.

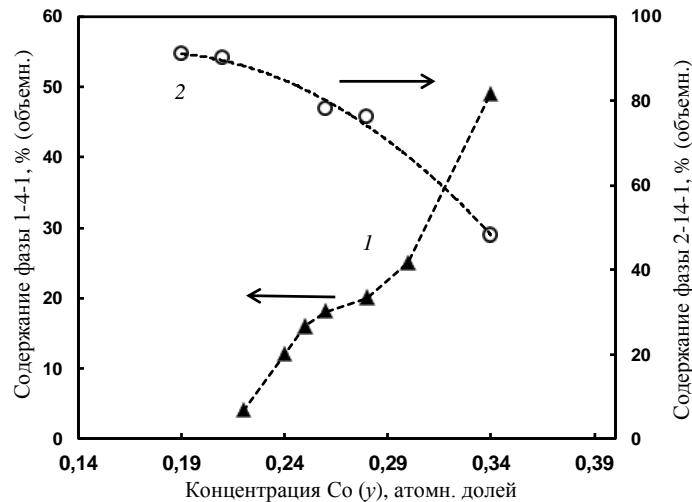


Рис. 4. Зависимость объемного содержания фаз в спеченном материале системы (Nd, Dy)–(Fe, Co)–В от концентрации кобальта: 1 – фаза 1-4-1; 2 – основная магнитная фаза 2-14-1

Видно, что с увеличением содержания кобальта в составе материала спеченного магнита объемное содержание фазы $(Nd_{0,33}Dy_{0,67})(Fe_{0,60}Co_{0,40})_4B$ (RF₄B) увеличивается и достигает 50 % при $y = 0,34$ атомн. долей. Поэтому вклад в намагниченность всего материала от этой фазы будет иметь величину $0,13 \cdot 10^6$ А/м, а вклад фазы (Nd, Dy)(Fe, Co)₃ составит $0,68 \cdot 10^6$ А/м, поскольку ее содержание 25 % (объемн.). Из данных рис. 4 видно, что количество фазы 1-4-1 в материале сравнимо с содержанием основной магнитной фазы 2-14-1, что совершенно недопустимо, поскольку именно основная магнитная фаза 2-14-1 определяет свойства материала для использования в приборах.

В работе [16] исследованы поликристаллические образцы $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$, отожженные при температуре 1000 °С в течение 120 ч. При температуре 77 К величина намагниченности в них составила 175 (А·м²)/кг, а при 293 К: 155 (А·м²)/кг. Этому соответствует довольно высокое значение температурного коэффициента намагниченности: $0,093$ (А·м²)/(кг·К⁻¹).

В работе [17] показано, что в спеченном материале $(Nd_{1-x}Dy_x)_{13-16}(Fe_{1-y}Co_y)_{ост}B_{7-9}$ (при $x = 0,49$; $y = 0,30$) содержание основной магнитной фазы $(Nd, Dy)_2(Fe, Co)_{14}B$ (фаза А) составляет 34 % (объемн.). Содержание фаз $(Nd, Dy)(Fe, Co)_4B$ (фаза 1-4-1) и $(Nd, Dy)(Fe, Co)_3$ (фаза 1-3) составляет 20 и 25 % (объемн.) соответственно. В образце состава $(Nd_{0,28}Dy_{0,71})_{14,64}(Fe_{0,66}Co_{0,34})_{77,34}B_{8,02}$ содержание основной магнитной фазы 2-14-1 составило 50 % (объемных), фазы $(Nd, Dy)(Fe, Co)_4B$ – также 50 % (объемн.), других фаз не обнаружено. Вклад в намагниченность фазы А при температуре 20 °С составит 4,34 МА/м. Таким образом, получается, что этот вклад приблизительно в 30 раз больше вклада фазы $(Nd_{0,33}Dy_{0,67})(Fe_{0,60}Co_{0,40})_4B$ (0,13 МА/м), так что вклад в намагниченность оказывается небольшим. Однако влияние посторонних фаз не ограничивается лишь прямым суммированием их намагниченности с намагниченностью основной фазы. Влияние посторонних фаз может быть косвенным. Например, если эти фазы находятся в промежутках между зернами основной магнитной фазы, они могут иметь определяющее значение для движения доменных стенок через границы от одной магнитной фазы к другой, а также служить местами зарождения доменов обратной намагниченности и таким образом влиять на свойства материала даже при небольших концентрациях.

Не так давно разработана многокомпонентная термодинамическая база данных для системы Nd–Fe–B–Mg [18], которая затем была расширена, так что в ней имеются термодинамические параметры, учитывающие взаимодействия атомов с Co, Ni, Dy, Pr, Cu, Ni и другими элементами в твердых и жидких растворах многокомпонентной системы. Эти данные необходимы для понимания сложных химических взаимодействий между компонентами постоянных магнитов и дают возможность для расчета термодинамических свойств и фазовых равновесий даже в отсутствие экспериментальных данных.

Помимо твердых растворов с железом с гранцентрированной (ГЦК) и объемноцентрированной (ОЦК) кубическими решетками, рассчитаны системы состава Fe–B–Nd₆. Система «Nd + твердый раствор $Fe_{14}(Nd, Dy)_2B$ » гексагональной плотноупакованной структуры (ГПУ) и ОЦК-твердые растворы описывались формализмом с подходом из двух подрешеток $(Nd, Dy)_I^I V_n^{II}$, где подрешетка I (узел замещения) может быть занята атомами Nd и Dy, а подрешетка II (междоузлие) – вакансией (Va). Количество промежуточных мест (n) равно 1 – для решетки ГПУ и 3 – для ОЦК-структур. В таком приближении молярная энергия Гиббса твердого раствора может быть выражена как

$$G = \sum_{i=Nd, Dy} y_i y_{Va} G_{i Va_n}^{\circ} + RT \sum_{i=Nd, Dy} y_i \ln y_i + \sum_{i,j=Nd, Dy} {}^a L_{i,j:Va} y_i y_j (y_j - y_i)^a, \quad (1)$$

где y_i и y_j – доли узлов i - и j -элементов в подрешетке I; R – газовая постоянная; $G_{i Va_n}^{\circ}$ – молярные энергии Гиббса фаз ГПУ или ОЦК (Nd и Dy). Двоичные параметры $L_{i,j:Va}$ между атомами i и j в подрешетке I – подбираемые параметры модели.

Поскольку элементы Nd и Dy имеют схожий химический состав, ожидалось, что Nd может заменить Dy в тройном соединении $Fe_{14}RE_2B$ (T1) (где RE – rare earth), образуя твердый раствор $Fe_{14}(Dy, Nd)_2B$. Твердый раствор смоделирован с использованием приближения из трех подрешеток. Термодинамическая оптимизация бинарных, тройных и четверных систем в многокомпонентной системе Dy–Nd–Fe–B выполнена на основе всех имеющихся термодинамических данных для соединений, твердых и жидких растворов и получены фазовые диаграммы (рис. 5).

Предельный случай этой фазовой диаграммы (при отсутствии кобальта) имеет отношение к материалу постоянных магнитов, представленных в данной статье. При температуре 1000 °С дополнительные фазы могут образовываться в такой системе лишь при концентрациях неодима больше 0,6. Это свидетельствует о том, что наличие кобальта значительно меняет энергию Гиббса в формуле (1). Перерасчет этой энергии и ее оптимизация необходимы для описания образования слабомагнитных фаз.

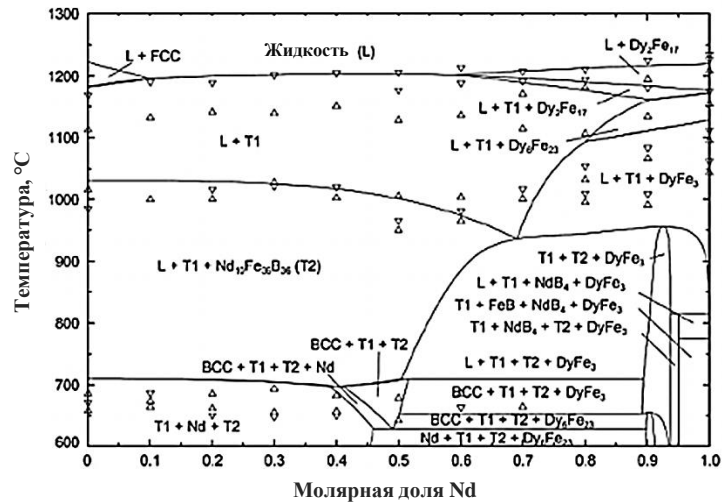


Рис. 5. Фазовая диаграмма, рассчитанная в работе [18] для системы (Nd, Dy)–(Fe)–В при молярной доле железа 0,75

Заключения

Спеченные материалы системы Nd–Dy–Fe–Co–В с высоким содержанием кобальта, полученные при стандартных условиях термообработки и размере зерен ~1 мкм, содержат большое количество посторонних фаз. Их вклад усредняется со вкладом основной магнитной фазы, давая в результате заниженные значения коэрцитивной силы, намагниченности и остаточной намагниченности. Это затрудняет использование данных сплавов с высоким содержанием кобальта в тех устройствах, где остаточная намагниченность важна. Необходимо проведение дальнейших исследований в части модификации основной магнитной фазы, частично легированной кобальтом, для снижения температурной зависимости намагниченности. При этом необходимо разработать технологию, которая позволяла бы контролировать фазовый состав с максимальным содержанием основной магнитной фазы и минимальным содержанием второстепенных фаз. Поэтому необходимо также исключить сильномагнитные фазы типа RF_4B и RF_3 и использовать в качестве магнитоизолирующей прослойки зерен основной магнитной фазы эвтектики как в классическом материале системы Nd–Fe–В. Достичь этого возможно путем выплавки сплава, легированного кобальтом, с близким по химическому составу к стехиометрическому, последующей гомогенизацией в вакуумных печах сопротивления. После этого на стадии порошкового передела можно использовать порошок-добавку эвтектического сплава на основе тяжелого РЗМ, который будет второстепенной фазой, изолирующей зерна основной магнитной фазы в материале постоянного магнита, и благодаря высокой активности РЗМ модифицировать поверхностные слои зерен этой фазы. В результате величина коэрцитивной силы постоянного магнита будет больше, но данный процесс необходимо проверить экспериментально.

Список источников

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие. Тула: Тульск. гос. ун-т, 2002. 392 с.
2. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М.: Энергия, 1969. 184 с.
3. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Валеев Р.А., Моисеева Н.С., Степанова С.В., Петраков А.Ф., Терешина И.С., Репина М.В. Термостабильные кольцевые магниты с радиальной текстурой на основе Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–В // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 3. С. 43–47.
4. Каблов Е.Н., Петраков А.Ф., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Назарова Н.В. Влияние диспрозия и кобальта на температурную зависимость намагниченности и фазовый состав материала системы Nd–Dy–Fe–Co–В // Металловедение и термическая обработка металлов. 2007. № 4. С. 3–10.

5. Christodoulou C.N., Wallace W.E., Massalski T.B. Magnetic hardening of Pr–Co–B sintered magnets // *Journal of Applied Physics*. 1989. Vol. 66. P. 2749–2751.
6. Gros Y., Hartmann-Boutron F., Meyer C. et al. Mossbauer study of compounds $RCo_{4-x}Fe_xB$ and RFe_4B // *Journal de Physique*. 1988. Vol. 49. P. C8-547–C8-548.
7. Gros Y., Hartmann-Boutron F., Meyer C. et al. Preparation and ^{57}Fe Mossbauer study of $PrCo_3FeB$, $NdCo_3FeB$, $SmCo_3FeB$ and $SmCo_2Fe_2B$ // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1988. Vol. 74. P. 319–326.
8. Herve M., Oliver I., Fernande G., Gary J.L. A structural magnetic and Mossbauer spectral study of the $DyCo_{4-x}Fe_xB$ compounds with $x = 0-3$ // *Faculty Research Creative Works*. URL: http://scholarsmine.mst.edu/faculty_work/39 (дата обращения: 15.06.2022).
9. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Моргунов Р.Б., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В. Температурная стабильность редкоземельных магнитов, поддерживаемая с помощью магнитокалорического эффекта // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 1 (54). С. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
11. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Резчикова И.И. Влияние легирования тербием и гадолинием на термостабильность и магнитные свойства спеченных материалов Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
12. Коплак О.В., Куницына Е.И., Валеев Р.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Ферромагнитные микропровода $\alpha-Fe/(PrDy)(FeCo)B$ для микроманипуляторов и полимерных композитов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 07. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-60-67.
13. Моргунов Р.Б., Коплак О.В., Таланцев А.Д., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А. Феноменология петель магнитного гистерезиса в многослойных микропроводах $\alpha-Fe/DyPrFeCoB$ // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-67-75.
14. Pedziwiatr A.T., Jiang S.Y., Wallace W.E. et al. Magnetic properties of RCo_4B compounds where $R = Y, Pr, Nd, Gd$ and Er // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1987. Vol. 66. P. 69–73.
15. Liao L.X., Altounian Z., Ryan D.H. Cobalt site preferences in iron rare-earth-based compounds // *Physical Review B*. 1993. Vol. 47. No. 17. P. 11230–11241.
16. Bolzoni F., Leccabue F., Moze O. et al. 3d and 4f magnetism in $Nd_2Fe_{14-x}Co_xB$ and $Y_2Fe_{14-x}Co_xB$ compounds // *Journal of Applied Physics*. 1987. Vol. 61. P. 5369–5373.
17. Buschow K.H.J., de Mooij D.B., Sinnema S. et al. Magnetic and crystallographic properties of ternary rare earth compounds of the type $R_2Co_{14}B$ // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1985. Vol. 51. P. 211–217.
18. Ende M.V., Jung I., Kim Y.H., Kim T. Thermodynamic optimization of the Dy–Nd–Fe–B system and application in the recovery and recycling of rare earth metals from $NdFeB$ magnet // *Green Chem*. 2015. Vol. 17. P. 2246–2261.

References

1. Raspopov V.Ya. *Micromechanical devices*: textbook. Tula: Tula State Univ., 2002, 392 p.
2. Arnold R.R. *Calculation and design of magnetic systems with permanent magnets*. Moscow: Energiya, 1969, 184 p.
3. Kablov E.N., Piskorsky V.P., Burkhanov G.S., Valeev R.A., Moiseeva N.S., Stepanova S.V., Petrakov A.F., Tereshina I.S., Repina M.V. Thermally stable ring magnets with radial texture based on Nd(Pr)–Dy–Fe–Co–B. *Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 2011, no. 3, pp. 43–47.
4. Kablov E.N., Petrakov A.F., Piskorsky V.P., Valeev R.A., Nazarova N.V. Influence of dysprosium and cobalt on the temperature dependence of magnetization and phase composition of the material of the Nd–Dy–Fe–Co–B system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 4, pp. 3–10.
5. Christodoulou C.N., Wallace W.E., Massalski T.B. Magnetic hardening of Pr–Co–B sintered magnets. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol. 66, pp. 2749–2751.
6. Gros Y., Hartmann-Boutron F., Meyer C. et al. Mossbauer study of compounds $RCo_{4-x}Fe_xB$ and RFe_4B . *Journal de Physique*, 1988, vol. 49, pp. C8-547–C8-548.

7. Gros Y., Hartmann-Boutron F., Meyer C. et al. Preparation and ^{57}Fe Mossbauer study of PrCo_3FeB , NdCo_3FeB , SmCo_3FeB and $\text{SmCo}_2\text{Fe}_2\text{B}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1988, vol. 74, pp. 319–326.
8. Herve M., Oliver I., Fernande G., Gary J.L. A structural magnetic and Mossbauer spectral study of the $\text{DyCo}_{4-x}\text{Fe}_x\text{B}$ compounds with $x = 0-3$. *Faculty Research Creative Works*. Available at: http://scholarsmine.mst.edu/faculty_work/39 (accessed: June 15, 2022).
9. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
10. Morgunov R.B., Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V. The thermal stability of rare-earth magnets supported by means of the magnetocaloric effect. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 1 (54), pp. 88–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-88-94.
11. Piskorskiy V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Rezhikova I.I. Terbium and gadolinium dopin g influence on thermal stability and magnetic properties of sintered magnets Pr-Tb-Gd-Fe-Co-B . *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.
12. Koplak O.V., Kunitsyna E.I., Valeev R.A., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Morgunov R.B. Ferromagnetic microwires $\alpha\text{-Fe}/(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ for micromanipulators and polymer composites. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 7. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-60-67.
13. Morgunov R.B., Koplak O.V., Talantsev A.D., Korolev D.V., Piskorskij V.P., Valeev R.A. The phenomenology of the magnetic hysteresis loops in multilayer microwires $\alpha\text{-Fe}/\text{DyPrFeCoB}$. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-67-75.
14. Pedziwiatr A.T., Jiang S.Y., Wallace W.E. et al. Magnetic properties of RCo_4B compounds where $\text{R} = \text{Y, Pr, Nd, Gd}$ and Er . *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1987, vol. 66, pp. 69–73.
15. Liao L.X., Altounian Z., Ryan D.H. Cobalt site preferences in iron rare-earth-based compounds. *Physical Review B*, 1993, vol. 47, no. 17, pp. 11230–11241.
16. Bolzoni F., Leccabue F., Moze O. et al. 3d and 4f magnetism in $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$ and $\text{Y}_2\text{Fe}_{14-x}\text{Co}_x\text{B}$ compounds. *Journal of Applied Physics*, 1987, vol. 61, pp. 5369–5373.
17. Buschow K.H.J., de Mooij D.B., Sinnema S. et al. Magnetic and crystallographic properties of ternary rare earth compounds of the type $\text{R}_2\text{Co}_{14}\text{B}$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1985, vol. 51, pp. 211–217.
18. Ende M.V., Jung I., Kim Y.H., Kim T. Thermodynamic optimization of the Dy-Nd-Fe-B system and application in the recovery and recycling of rare earth metals from NdFeB magnet. *Green Chemistry*, 2015, vol. 17, pp. 2246–2261.

Информация об авторах

Валеев Руслан Анверович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Королев Дмитрий Викторович, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пискорский Вадим Петрович, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ruslan A. Valeev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry V. Korolev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vadim P. Piskorskiy, Deputy Head of Laboratory, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 06.07.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 08.08.2022.

The article was submitted 06.07.2022; approved and accepted for publication after reviewing 08.08.2022.