

УДК 537.622

Е.Н. Каблов¹, О.Г. Оспенникова¹, И.И. Резчикова¹, Р.А. Валеев¹,
И.В. Чередниченко¹, Р.Б. Моргунов^{1,2}

СРАВНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ МАГНИТОВ НА ОСНОВЕ SmCo И PrDy–FeCo–B

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-S2-42-46

Произведено сравнение температурных зависимостей намагниченности сплавов на основе SmCo и PrDy–FeCo–B и вариаций параметров петель гистерезиса с температурой в диапазоне эксплуатации магнитов $-80\div+80^{\circ}\text{C}$. Установлено, что сплавы PrDy–FeCo–B имеют значительно более высокую температурную стабильность и заметно меньшие вариации параметров петель гистерезиса.

Ключевые слова: магнитный материал, температурная стабильность, коэрцитивная сила, легирование, кобальт.

The comparison of the temperature dependencies of the magnetic susceptibility of SmCo and PrDy–FeCo–B alloys and variations of magnetic hysteresis parameters with the temperature within the range of operating of magnets from -80°C up to $+80^{\circ}\text{C}$ was made. It has been established that PrDy–FeCo–B alloys have higher temperature stability and lesser variations of hysteresis parameters.

Keywords: magnetic material, temperature stability, coercivity, alloying, cobalt.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химической физики РАН [Federal State Budgetary Science establishment Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences] E-mail: director@icp.ac.ru

Введение

Спеченные редкоземельные магниты типа PrDy–FeCo–B имеют наилучшую температурную стабильность в наиболее востребованном температурном диапазоне $-80\div+80^{\circ}\text{C}$ по сравнению с другими видами магнитов, таких как магниты на основе редкоземельных (RE) и переходных (TM) металлов системы RE–TM–B [1–7]. Однако такое сравнение с другими промышленными магнитами производится редко. В частности, наиболее распространенные магниты SmCo также необходимо характеризовать их температурной стабильностью для сравнения с аналогичным параметром магнитов PrDy–FeCo–B. Эксплуатация магнитов в указанном температурном диапазоне сопровождается значительными трудностями – например, низкие температуры Кюри (T_c) для представленных сплавов неизбежно приводят к отрицательному наклону кривой зависимости магнитного момента от температуры $M(T)$ [8–13]. Главная сложность заключается в том, чтобы уменьшить его значения, сделав спад намагниченности сосредоточенным как можно ближе к критической температуре T_c . Другой проблемой является использование температурного коэффициента остаточной магнитной индукции (ТКИ), который характеризует производную dM/dT в узком диапазоне температур и не дает представления о крутизне кри-

вой температурной зависимости намагниченности во всем диапазоне температур, значимом для технологического применения. Наконец, отсутствует информация о физических механизмах стабилизации намагниченности, поскольку анализ такого рода требует получения набора петель магнитного гистерезиса в изучаемом диапазоне температур. Это помогло бы ответить на вопрос, какие именно характеристики стабилизируются в температурном диапазоне при смене типа магнитов – коэрцитивная сила, намагниченность насыщения, крутизна и форма петли намагничивания и др.

Для решения этих проблем выполнена данная работа, заключающаяся в том, чтобы:

- охарактеризовать температурную стабильность намагничивания не одним числом (ТКИ), а дать полную температурную зависимость;
- сравнить температурную стабильность магнитов SmCo и PrDy–FeCo–B, которые наиболее востребованы на производстве;
- установить, какие параметры петель гистерезиса магнитов меняются в температурном диапазоне эксплуатации.

Материалы и методы

Образцы состава $(\text{NdDy})_{16,2}(\text{FeCo})_{78,1}\text{B}_{5,7}$ получены путем спекания монокристаллических частиц сплава в высоковакуумной печи. Подробно

Типы образцов, использованных в экспериментах

Материал	Марка	Изготовитель
(NdDy) _{16,2} (FeCo) _{78,1} B _{5,7}	A32-5	ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ
SmCo	КСГЭ-26	ООО «ПОЗ-Прогресс»
	КС25ДЦ	То же

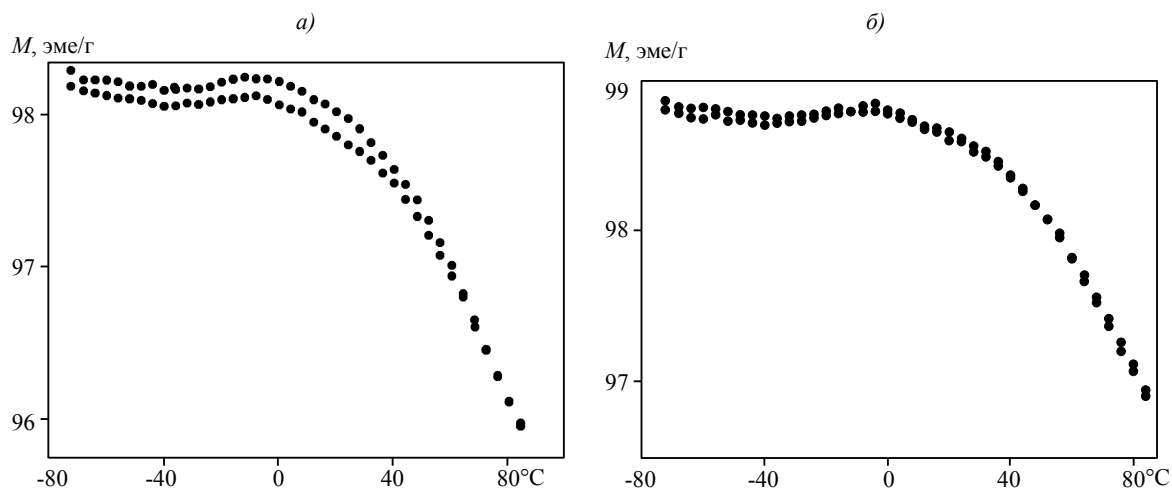


Рис. 1. Температурные зависимости магнитного момента M для материала марки КСГЭ-26, измеренные в «нулевом» поле при нагревании образца (а) и в поле напряженностью 3 кЭ (б) при двукратном прохождении температурного диапазона (охлаждение – в «нулевом» поле)

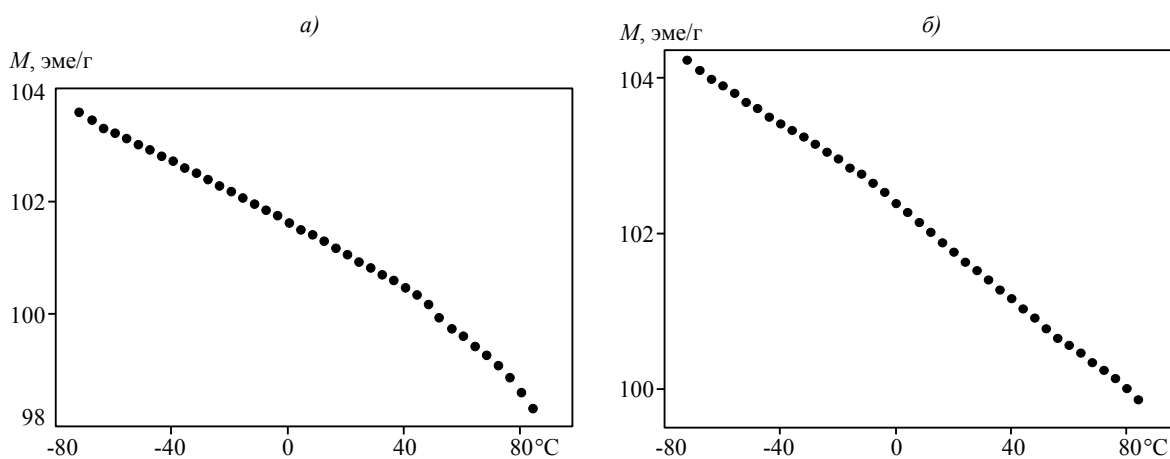


Рис. 2. Температурные зависимости магнитного момента M для материала марки КС25ДЦ, измеренные в «нулевом» поле при нагревании образца (а) и в поле напряженностью 3 кЭ (б) при двукратном прохождении температурного диапазона (охлаждение – в «нулевом» поле)

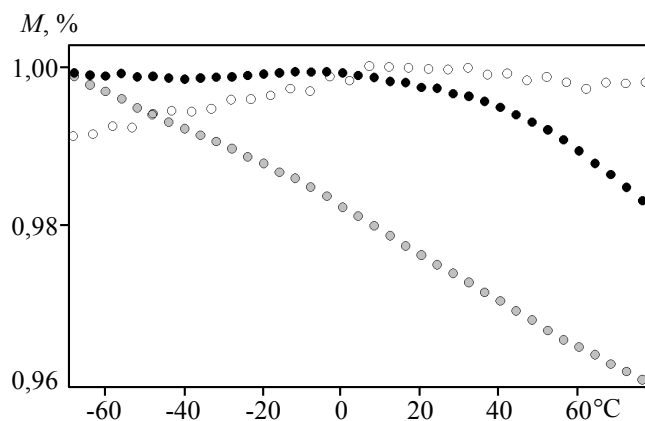


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности образцов из материалов марок КСГЭ-26 (●), КС25ДЦ (●) и А32-5 (ВИАМ) (○)

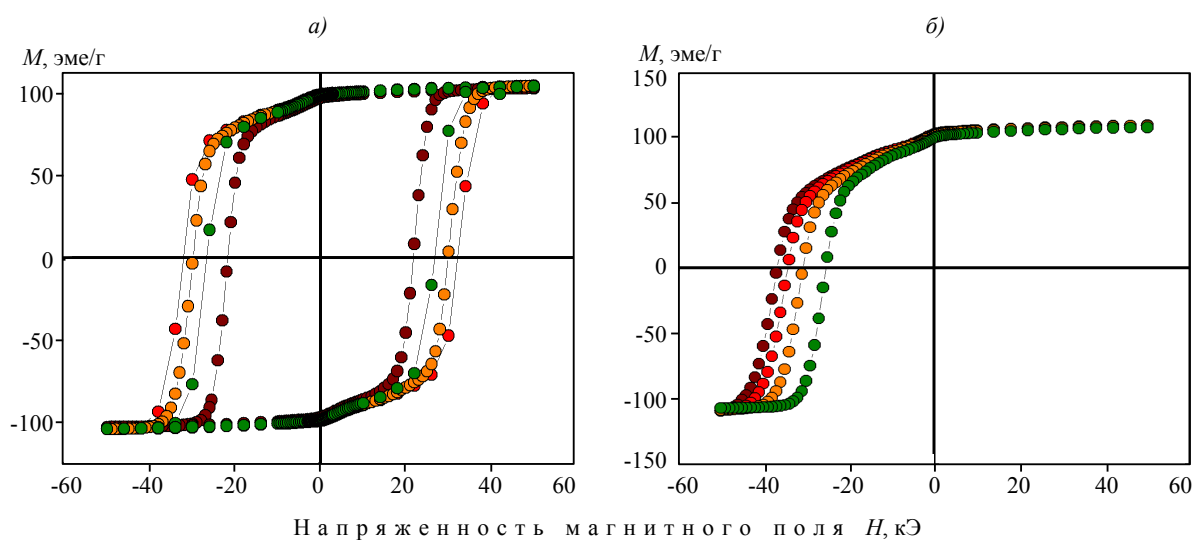


Рис. 4. Петли магнитного гистерезиса (а: -20 (●), 0 (●), 30 (●), 80°C (●)) и полевые зависимости (б: -20 (●), 0 (●), 30 (●), 80°C (●)) намагниченности образца из материала марки КСГЭ-26, измеренные при различных температурах

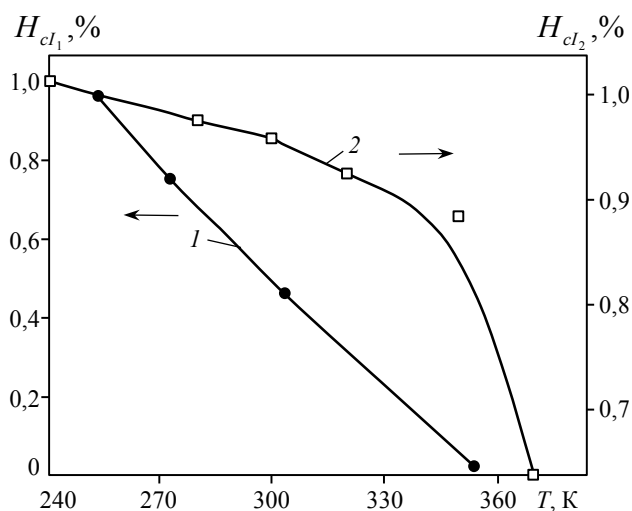


Рис. 5. Температурные зависимости коэрцитивной силы H_{cl} образцов из материалов марок КСГЭ (1) и А32-5 (ВИАМ) (2)

методика их изготовления и результаты химического и фазового анализа приведены в работах [14, 15]. Исследование неоднородности материалов и локального химического состава фаз проводили методом микрорентгеноспектрального анализа с помощью анализатора JСМА-733. Образцы состояли из двух фаз – $(\text{NdDySm})_2(\text{FeCo})_{14}\text{B}$ и $(\text{NdDySm})_2(\text{FeCo})_2\text{B}$, доли которых составляли 85 и 15% соответственно; исследовали три типа образцов (см. таблицу).

Для образцов, имеющих форму пластины размером $0,5 \times 2 \times 4$ мм, с помощью магнитометра MPMS 5XL Quantum Design при различных температурах (190–350 К) получены петли магнитного гистерезиса в интервале напряженностей магнитного поля $H = -50 \div +50$ кЭ. Получены также температурные зависимости намагниченности $M(T)$ в магнитном поле напряженностью $H = 3$ кЭ (близком к полю, в котором используются изделия из магнитов) и при различных температурах. Образцы во время экспериментов располагали в атмосфере гелия, как и при их планируемой эксплуатации, поэтому окисление поверхности и другие факторы не могли повлиять на результаты экспериментов.

Результаты и обсуждение

На рис. 1. представлены температурные зависимости магнитного момента образца из материала марки КСГЭ-26, измеренные в «нулевом» внешнем магнитном поле (рис. 1, а) и в поле напряженностью 3 кЭ (рис. 1, б). В обоих случаях измерение магнитного момента производили в процессе нагрева образцов в «нулевом» магнитном поле. Двукратное прохождение температурного диапазона в одинаковых условиях (рис. 1, а) дает представление о величине разброса. Этот разброс не связан с точностью СКВИД-магнитометра, способного определять магнитный момент с точностью 10^{-7} эме (размерность дана в международной системе единиц – NBS U.S.). Разброс значений мог быть вызван небольшой разориентацией главной оси намагниченности образца при процедурах установки и изъятия образца. Видна тенденция к спаду намагниченности с ростом температуры по мере приближения к температуре Кюри.

На рис. 2 представлены аналогичные температурные зависимости магнитного момента образца из материала марки КС25ДЦ, измеренные в «нулевом» внешнем магнитном поле (рис. 2, а) и в поле напряженностью 3 кЭ (рис. 2, б). Видно, что падение намагниченности при нагревании происходит более плавно, чем в образцах из материала марки КСГЭ-26.

На рис. 3 показано сравнение температурных зависимостей остаточного магнитного момента (в «нулевом» магнитном поле) для всех трех исследованных марок образцов в процентах от максимальной намагниченности в заданном температурном диапазоне. Видно, что лучшие результаты по намагниченности у образца марки А32-5.

Для сравнения характеристик магнитов, относящихся к петле гистерезиса, магнитный гистерезис записали при разных температурах для всех типов образцов. В качестве примера температурных вариаций гистерезиса приведены лишь петли магнитного гистерезиса для образца из материала КСГЭ-26 (рис. 4). Видно, что намагниченность насыщения практически не изменяется с температурой, в то время как коэрцитивная сила H_{cl} претерпевает существенные изменения.

На рис. 5 приведено сравнение температурных зависимостей коэрцитивной силы в образцах из материалов марок КСГЭ-26 (1) и А32-5 (2). Видно, что для образца из материала марки А32-5 резкое уменьшение коэрцитивной силы наблюдается лишь при температуре >353 К (80°C), т. е. вне температурного диапазона эксплуатации. В то же время образец из материала КСГЭ-26 демонстрирует плавное снижение коэрцитивной силы во всем диапазоне температур, что нежелательно при практическом применении.

Заключение

Установлено, что сплавы PrDy-FeCo-B имеют значительно более высокую температурную стабильность и заметно меньшие вариации значений коэрцитивной силы в температурном диапазоне эксплуатации магнитов ($-80 \div +80^\circ\text{C}$) по сравнению с магнитами на основе SmCo . Температурная стабилизация достигается за счет резкого падения магнитных параметров вблизи температуры Кюри у образцов состава PrDy-FeCo-B .

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ 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.
2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // *Труды ВИАМ*. 2013. №2. Ст. 01 (viam-works.ru).
3. Каблов Е.Н., Сиваков Д.В., Гуляев И.Н., Сорокин К.В., Федотов М.Ю., Гончаров В.А. Методы исследования конструкционных композиционных материалов с интегрированной электромеханической системой // *Авиационные материалы и технологии*. 2010. №4. С. 17–20.
4. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнлегированных сплавов с применением эталона // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 9–11.

5. Чабина Е.Б., Алексеев А.А., Филонова Е.В., Лукина Е.А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 06 (viam-works.ru).
6. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П. и др. Аномальное влияние добавок Sm на магнитные свойства интерметаллидов $(Nd_{1-x}Sm_xDy)(FeCo)B$ // ЖЭТФ. 2015. Т. 148. №3. С. 493–502.
7. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П. и др. Конкуренция механизмов намагничивания в сплавах $(NdDy)(FeCo)B$, легированных самарием // Физика низких температур. 2016. Т. 42. №1. С. 60–66.
8. Cook J.S., Rossiter P.L. Rare-earth iron boron supermagnets //Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. 1989. V. 15. P. 509–550.
9. Burzo E. Permanent magnets based on R–Fe–B and R–Fe–C alloys //Rep. Prog. Phys. 1998. V. 61. P. 1099–1266.
10. Kirchmayr H.R. Permanent magnets and hard magnetic materials //J. Phys. D: Appl. Phys. 1996. V. 29. P. 2763–2778.
11. Strnat K.J. Modern Permanent Magnets for Applications in Electro-Technology //Proceedings of the IEEE. 1990. V. 78. P. 923–946.
12. Skomski R., Manchanda P., Kumar P., Balamurugan B., Kashyap A., Sellmyer D.J. Predicting the Future of Permanent-Magnet Materials // IEEE Transactions On Magnetism. 2013. V. 49. P. 3215–3220.
13. Fidler J., Schrefl T. Overview of Nd–Fe–B magnets and coercivity (invited) //J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 5029–5034.
14. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Kablov D.E. et al. Bifurcation of magnetic anisotropy caused by small addition of Sm in $(Nd_{1-x}Sm_xDy)(FeCo)B$ magnetic alloy //J. Appl. Phys. 2015. V. 117. P. 243903.1–243903.5.
15. Каблов Е.Н., Пискорский В.П., Брук Л.А. Постоянные магниты из сплавов Nd–Fe–B /В кн. Авиационные материалы и технологии Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: МИСИС–ВИАМ. 2002. С. 191–197.