

**Магнитные свойства и процессы перемагничивания сплавов
Sm-Gd-Zr-Co-Cu-Fe**

П.А. Ракунов, М.Б. Ляхова, Е.М. Семенова, А.Ю. Карпенков
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170002, Россия, Тверская область, Тверь, Садовый пер., 35
pavel.rakunov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.258

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований магнитных свойств и процессов перемагничивания серии сплавов *Sm-Gd-Zr-Co-Cu-Fe*. Исследуемые образцы были подвергнуты термическим обработкам по специальным режимам, что позволило добиться формирования определенной наноструктуры, влияющей на гистерезисные свойства материала и позволяющей достичь высококоэрцитивного состояния. По данным магнитных измерений, выполненных методом вибрационного магнитометра, построены петли гистерезиса, зависимости намагниченности насыщения, коэрцитивной силы от химического состава, определены величины температурного коэффициента изменения намагниченности в зависимости от относительного содержания *Sm* и *Gd*. Показано, что замещение части атомов самария на атомы гадолиния увеличивает роль механизма необратимого вращения вектора спонтанной намагниченности в процессе перемагничивания образцов. Применение исследуемых образцов в различных устройствах предъявляет повышенные требования к стабильности их магнитных свойств при высоких температурах. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что наибольшей коэрцитивной силой обладают соединения с содержанием гадолиния $x=0,5$, наилучшей температурной стабильностью обладают соединения с концентрацией гадолиния в диапазоне $x=0,5-0,6$.

Ключевые слова: редкоземельные интерметаллиды, магнитотвердые материалы, гистерезис, коэрцитивная сила, намагниченность, процессы перемагничивания.

1. Введение

Сплавы на основе редкоземельных элементов с железом и кобальтом представляют собой один из ключевых объектов исследований в области материаловедения благодаря их уникальным магнитным свойствам и широкому спектру применений [1-3]. Кроме того, данные материалы зарекомендовали себя как основа для высокоэффективных постоянных магнитов. Развитие современных технологий требует увеличения верхней границы диапазона рабочих температур постоянных магнитов [4-5]. В этом направлении наибольший интерес представляют многокомпонентные сплавы, такие как *Sm-Zr-Co-Cu-Fe*, которые обладают уникальными магнитными свойствами, такими как высокая коэрцитивная сила, намагниченность и энергетическое произведение, что делает их незаменимыми в таких применениях, как электродвигатели, генераторы, датчики и другие устройства [6-9].

Режимы применяемых термических обработок влияют на формирование микро- и наноструктуры сплава, что определяет

гистерезисные свойства материала. В связи с этим интересной задачей является исследование влияния термообработок на магнитные свойства материалов на основе соединений $Sm-Zr-Co-Cu-Fe$.

Замещение части атомов Sm на тяжелые редкоземельные металлы, например Gd , позволяет добиться более высокого уровня температурной стабильности магнитных свойств сплавов [10-13]. В связи с этим значительный интерес представляет влияние химического состава на магнитные свойства материала. Изучение таких сплавов может привести к значительным прорывам в области высокоэффективных магнитных материалов и способствует дальнейшему развитию технологий, требующих высоких магнитных свойств. В настоящей работе представлены результаты исследований магнитных характеристик многокомпонентных сплавов $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$, где $x=0; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1$.

2. Объекты и методы исследования

Исходные сплавы были синтезированы методом высокочастотной индукционной плавки в атмосфере аргона по специальному режиму с медленным охлаждением, что позволяло получить крупнозернистые слитки с размерами зерен до 3 мм.

Формирование коэрцитивного состояния достигалось путем применения комплекса термических обработок (ТО), которые состояли из нескольких этапов и проводились в высоком вакууме в трубчатой трехзонной печи TZF 15/610. Первый этап ТО: высокотемпературная обработка – отжиг при температурах 1180-1185°C в течение 3 часов с закалкой до комнатной температуры для формирования пересыщенных твердых растворов в структурных составляющих образцов. Второй этап ТО: низкотемпературная обработка – изотермический отжиг при 800°C длительностью 24 часа с медленным охлаждением со скоростью $\sim 2^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 400°C. В процессе этого отжига в сплавах происходит распад твердых растворов и формируется сложная структура фаз, которая и обеспечивает высококоэрцитивное состояние образцов.

Образцы для исследований выкалывались из крупнозернистых слитков. Каждый из образцов представлял собой одно зерно сплава диаметром 2-3 мм и их поведение в магнитном поле было аналогично образцам с одноосной магнитной анизотропией. Это связано с тем, что, несмотря на то, что сплавы данного типа имеют сложную гетерогенную структуру, но все фазы обладают гексагональными кристаллическими решетками, которые в объеме образцов когерентно связаны. Магнитные измерения были выполнены на образцах сферической формы (фактор

формы $N \approx 1/3$) индукционным методом на вибрационном магнитометре. Погрешность измерения удельной намагниченности по отношению к эталонному образцу из отожженного Ni не превышала 1,5%. Источником постоянного магнитного поля являлся электромагнит с максимальной величиной поля $\mu_0 H = \pm 3,0$ Тл. Точность измерения поля составляла 2,5%. Температурная приставка к установке позволяла выполнять измерения удельной намагниченности в диапазоне температур от комнатной до 730°C. Перед проведением измерений удельной намагниченности все образцы намагничивались в импульсных полях $\mu_0 H = 8,0$ Тл.

3. Результаты и их обсуждение

На первом этапе экспериментальных исследований были измерены полные петли гистерезиса всех образцов, из которых в дальнейшем определены величины удельных остаточной намагниченности σ_r , намагниченности насыщения σ_s и коэрцитивной силы H_{cl} . На рис. 1 представлены размагничивающие части петель гистерезиса всех исследуемых образцов. Из полученных данных были построены размагничивающие части петель гистерезиса в координатах «магнитная индукция B » – «истинное магнитное поле H », а также кривые энергетического произведения $BH(B)$, по которым были определены величины максимального энергетического произведения BH_{max} (см. Таблицу 1).

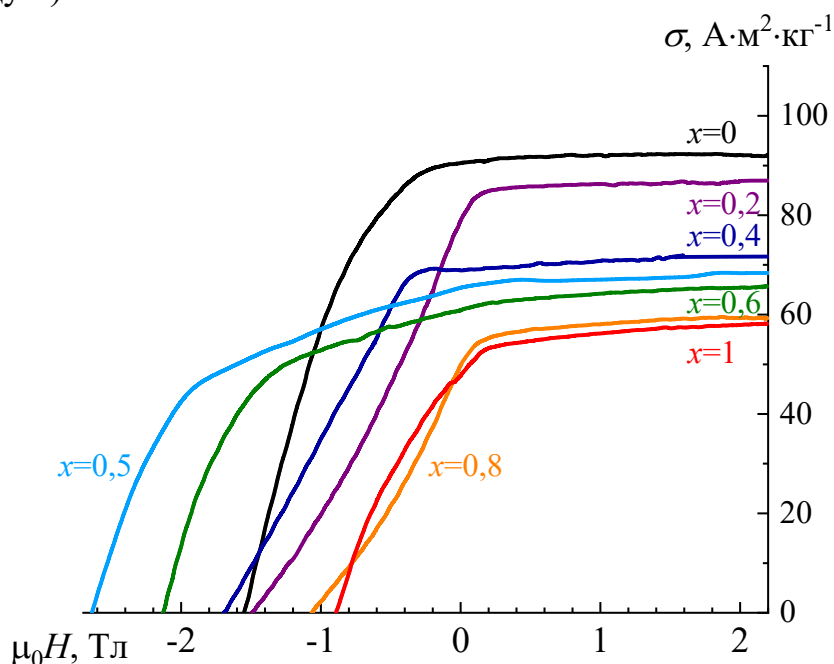


Рис. 1. Размагничивающие части петель гистерезиса образцов гетерогенных сплавов $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$.

Таблица 1. Магнитные характеристики сплавов $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$.

x	0,0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
H_{cl} , Тл	1,5	1,58	1,78	2,6	2,11	1,05	0,89
H_{cB} , Тл	0,9	0,48	0,47	0,67	0,61	0,36	0,41
BH_{max} , кДж/м ³	186,5	131,61	113,15	98,89	86,31	52,46	49,76

На рис. 2 представлены концентрационные зависимости намагниченности насыщения σ_s (см. рис. 2 а) и коэрцитивной силы H_{cl} (см. рис. 2 б). Видно, что с увеличением концентрации гадолиния намагниченность насыщения уменьшаются, а коэрцитивная сила имеет максимум в области концентраций Gd $x = 0,5$.

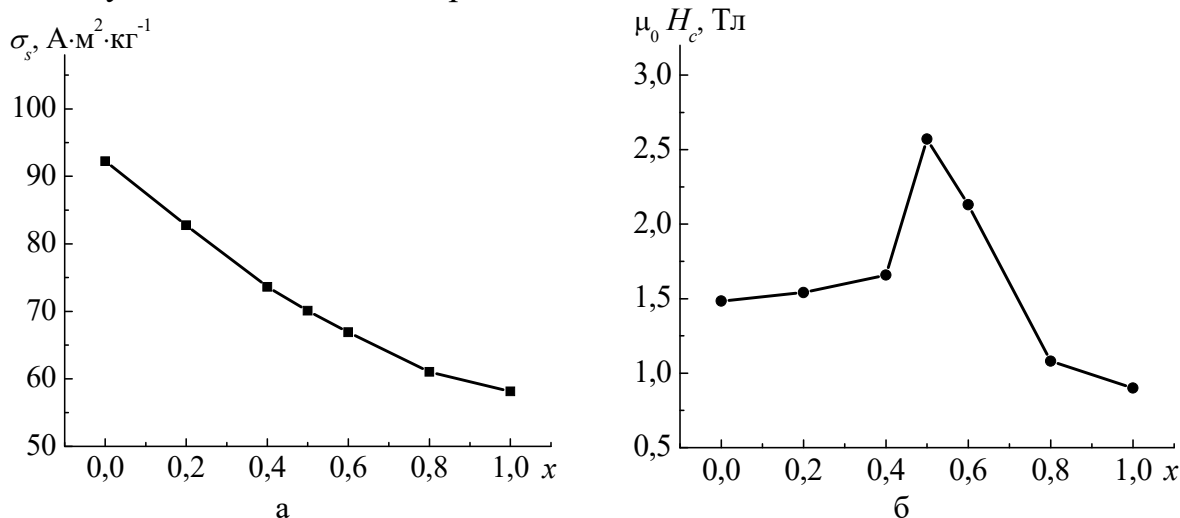


Рис. 2. Концентрационные зависимости: а – намагниченности насыщения образцов, б – коэрцитивной силы образцов соединений $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$.

Как известно из работы [13] в сплавах данного типа реализуется смешанный механизм магнитного гистерезиса: задержка смещения доменных границ на структурных неоднородностях и необратимое вращение вектора спонтанной намагниченности в наиболее низкоанизотропных областях структуры. Для подтверждения механизма перемагничивания исследуемых образцов за счет процессов необратимого вращение вектора спонтанной намагниченности в наиболее низкоанизотропных областях структуры был проведен следующий эксперимент. Первоначально образцы намагничивались до насыщения вдоль оси легкого намагничивания, затем подвергались воздействию размагничивающего поля $\mu_0 H_{df}$ конкретной величины от 0 до 2,0 Тл с шагом 0,1-0,2 Тл. Режим измерения (протокол № 1) включал следующие этапы: измерение намагниченности насыщения σ_s вдоль оси легкого намагничивания → приложение размагничивающего поля H_{df} и измерение текущего значения удельной намагниченности σ_1 (стадия 1 на рис. 3 а) →

поворот штока магнитометра на угол 45° (стадия 2 на рис. 3 а) и выдержка в течении 20 с (стадия 3 на рис. 3 а) → обратное вращение штока на угол 45° (стадия 4 на рис. 3 а) и измерение текущего значения удельной намагниченности σ_2 . В последующем из полученных данных рассчитывалось отношение разности значений $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$ к величине намагниченности насыщения σ_s . На рис. 3 а, б представлены временные зависимости удельной намагниченности и зависимость отношения $\Delta\sigma/\sigma_s$ от величины $\mu_0 H_{df}$ для образца с $x = 0,8$ соответственно.

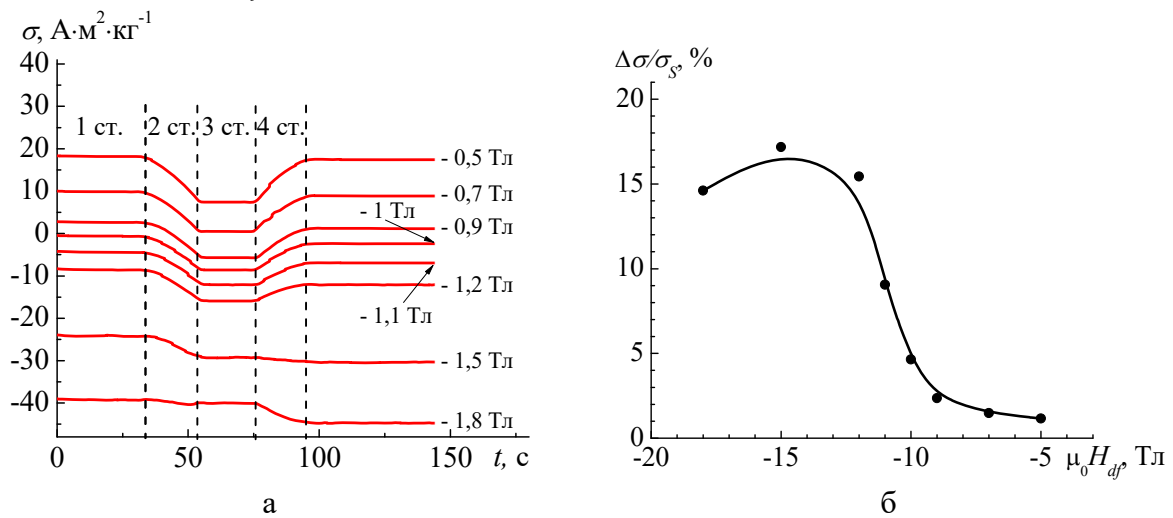


Рис. 3. Измерение удельной намагниченности по протоколу № 1: а – временные зависимости удельной намагниченности; б – зависимость $\Delta\sigma/\sigma_s$ от величины $\mu_0 H_{df}$ для образца $(\text{Sm}_{0,2}\text{Gd}_{0,8})_{0,85}\text{Zr}_{0,15}(\text{Co}_{0,690}\text{Cu}_{0,088}\text{Fe}_{0,222})_{6,0}$.

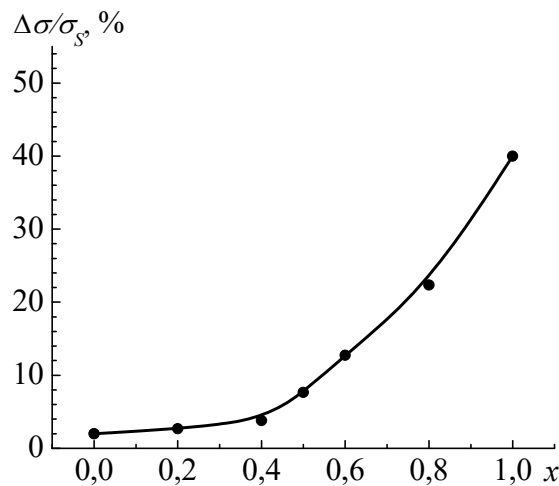


Рис. 4. Концентрационная зависимость величины $\Delta\sigma/\sigma_s$ образцов сплавов $(\text{Sm}_{1-x}\text{Gd}_x)_{0,85}\text{Zr}_{0,15}(\text{Co}_{0,690}\text{Cu}_{0,088}\text{Fe}_{0,222})_{6,0}$.

По результатам измерений построена концентрационная зависимость максимальных значений $\Delta\sigma/\sigma_s$ для всех исследуемых образцов (см. рис. 4). Хорошо видно, что увеличение содержания Gd в сплаве, начиная с

концентрации $x = 0,5$ приводит к резкому увеличению части объема образца, перемагничивающегося за счет необратимого вращения вектора спонтанной намагниченности.

Следующим этапом экспериментальных исследований стало проведение измерений, в которых этапу поворота штока магнитометра (стадия 1 на рис. 3 а) предшествовала выдержка образцов в размагничивающем поле H_{df} (протокол № 2) в течение 10 минут. В ходе данных экспериментов была построена концентрационная зависимость максимальных значений $\Delta\sigma/\sigma_s$, представленная на рис. 5 красной кривой. Для сравнения на этом же рисунке черной кривой показаны результаты исследований с нулевым временем выдержки при H_{df} . Анализ зависимостей показывает, что для образцов с концентрацией Gd $x > 0,4$, измеренных по протоколу № 2, значения $\Delta\sigma/\sigma_s$ превосходят аналогичные значения, полученные в ходе эксперимента по протоколу № 1. Данный результат исключает влияние релаксационных процессов (магнитное последствие, магнитная вязкость) на величину $\Delta\sigma/\sigma_s$.

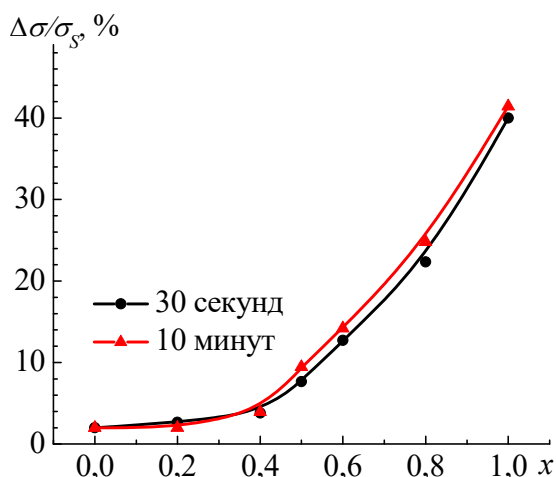


Рис. 5. Концентрационные зависимости величины $\Delta\sigma/\sigma_s$, полученные в ходе экспериментов по протоколу №1 (черная кривая) и №2 (красная кривая) для образцов $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$.

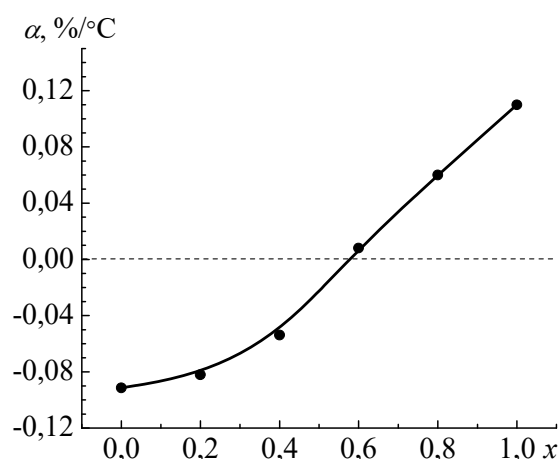


Рис. 6. Концентрационная зависимость коэффициента изменения намагниченности сплавов $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$ в температурном интервале 20-100°C.

Далее были проведены измерения магнитных характеристик в температурном диапазоне 50-350°C. Были определены величины температурного коэффициента изменения намагниченности $\alpha = \partial\sigma_r / \partial T$ в температурном диапазоне 20-100°C. На рис. 6 приведена концентрационная зависимость коэффициента $\alpha(x)$. Видно, что наилучшей температурной стабильностью магнитных свойств обладают составы с концентрацией x в диапазоне 0,5-0,6.

4. Заключение

Показано, что гомогенизирующий отжиг при 1180-1185°C в течение 3 часов и изотермический отжиг при 800°C длительностью 24 часа сплавов $(Sm_{1-x}Gd_x)_{0,85}Zr_{0,15}(Co_{0,690}Cu_{0,088}Fe_{0,222})_{6,0}$ ($x=0; 0,2; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1$) приводит к формированию микро- и наноструктуры, обеспечивающей высококоэрцитивное состояние. По данным магнитных измерений, выполненных методом вибрационного магнитометра, построены зависимости коэрцитивной силы и намагниченности насыщения от химического состава. Максимальные значения коэрцитивной силы (2,57 Тл), и удельной намагниченности насыщения (126 А·м²/кг) достигаются на образце с концентрацией гадолиния $x=0,5$. В ходе экспериментов, в которых исследуемые образцы подвергались воздействию внешнего размагничивающего поля, направленного под углом 45° к оси легко намагничивания, было показано, что замещение атомов самария на гадолиний приводит к увеличению части объема, перемагничивающейся за счет необратимого вращения вектора спонтанной намагниченности. Из всей серии исследуемых сплавов наилучшей стабильностью магнитных свойств обладают составы с концентрацией Gd $x=0,5-0,6$. Установлено, что с ростом концентрации Gd , коэффициент температурных изменений намагниченности α меняет знак с отрицательного (для составов с высоким содержанием Sm) до положительного (для составов с замещением атомов Sm на атомы Gd). Анализ температурной стабильности сплавов на основе $Sm-Gd-Zr-Co-Cu-Fe$ при различных температурах является ключевым для надежности их применения в реальных условиях эксплуатации.

Исследования выполнены при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 0817-2023-0006) в научно-исследовательской лаборатории магнитных материалов Центра коллективного пользования научной аппаратурой и оборудованием ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет».

Библиографический список:

1. Coey, J.M.D. Perspective and prospects for rare earth permanent magnets / J.M.D. Coey // Engineering. – 2020. – V. 6. – I. 2. – P. 119-131. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.034.
2. Jha, A.R. Rare earth materials: properties and applications / A.R. Jha. – Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2014. – 371 p. DOI: 10.1201/b17045.
3. Liu, S. Sm-Co high-temperature permanent magnet materials / S. Liu // Chinese Physics B. – 2019. – V. 28. – I. 1. – P. 017501-1-017501-20. DOI: 10.1088/1674-1056/28/1/017501.
4. Golovnia, O.A. Hard magnetic properties and the features of nanostructure of high-temperature Sm-Co-Fe-Cu-Zr magnet with abnormal temperature dependence of coercivity / O.A. Golovnia, A.G. Popov, N.V. Mushnikov et al. // Nanomaterials. – 2023. – V. 13. – I. 13. – Art. №. 1899. – 14 p. DOI: 10.3390/nano13131899.
5. Duerrschabel, M. Atomic structure and domain wall pinning in samarium-cobalt-based permanent magnets / M. Duerrschabel, M. Yi, K. Uestuener et al. // Nature communications. – 2017. – V. 8. – I. 1. – Art. №. 54. – 7 p. DOI: 10.1038/s41467-017-00059-9.
6. Semenova, E.M. Micro- and nanostructures of RCoCuFeZr heterogeneous alloys with high temperature

- stability / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, A. Ivanova, M.N. Ulyanov // *Materials Science Forum*. – 2016. – V. 845. – P. 46-49. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.845.46.
7. **Horiuchi, Y.** Influence of intermediate-heat treatment on the structure and magnetic properties of iron-rich $\text{Sm}(\text{CoFeCuZr})_z$ sintered magnets / Y. Horiuchi, M. Hagiwara, M. Endo, N. Sanada, S. Sakurada // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – V. 117. – I. 17. – Art. №. 17C704. – 4 p. DOI: 10.1063/1.4906757.
8. **Sepehri-Amin, H.** Correlation of microchemistry of cell boundary phase and interface structure to the coercivity of $\text{Sm}(\text{Co}_{0.784}\text{Fe}_{0.100}\text{Cu}_{0.088}\text{Zr}_{0.028})_{7.19}$ sintered magnets / H. Sepehri-Amin, J. Thielsch, J. Fischbacher et al. // *Acta Materialia*. – 2017. – V. 126. – P. 1-10. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.12.050.
9. **Song, K.** Revealing on metallurgical behavior of iron-rich $\text{Sm}(\text{Co}_{0.65}\text{Fe}_{0.26}\text{Cu}_{0.07}\text{Zr}_{0.02})_{7.8}$ sintered magnets / K. Song, W. Sun, H. Chen et al. // *AIP Advances*. – 2017. – V. 7. – I. 5. – Art. №. 056238. – 7 p. DOI: 10.1063/1.4978464.
10. **Dormidontov, A.G.** Structure of alloys for $(\text{Sm,Zr})(\text{Co,Cu,Fe})_z$ permanent magnets: first level of heterogeneity / A.G. Dormidontov, N.B. Kolchugina, N.A. Dormidontov, Yu.V. Milov // *Materials*. – 2020. – V. 13. – I. 17. – Art. №. 3893. – 18 p. DOI: 10.3390/ma13173893.
11. **Jiang, C.B.** Recent progress in high temperature permanent magnetic materials / C.B. Jiang, S.Z. An // *Rare Metals*. – 2013. – V. 32. – I. 5. – P. 431-440. DOI: 10.1007/s12598-013-0162-6.
12. **Lyakhova, M.B.** High-temperature behavior of hard magnetic alloys $(\text{R,Zr})(\text{Co,Cu,Fe})_z$ (R= Sm, Gd) / M.B. Lyakhova, E.M. Semenova, R.P. Ivanov // *Metal Science and Heat Treatment*. – 2015. – V. 56. – I. 11-12. – P. 602-608. DOI: 10.1007/s11041-015-9807-4.
13. **Ляхова, М.Б.** Структура и магнитные свойства сплавов $(\text{R,Zr})(\text{Co,Cu, Fe})_z$ (R = Sm, Gd) / М.Б. Ляхова, Е.М. Семенова, П.А. Ракунов и др. // *Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов*. – 2023. – Вып. 15. – С. 169-177. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.169.
14. **Semenova, E.M.** Mechanisms of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Gd–Zr–Co–Cu–Fe Alloys / E.M. Semenova, M.B. Lyakhova, P.A. Rakunov, A.Yu. Karpenkov, Yu.V. Konyukhov // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2024. – V. 88. – I. 5. – P. 802-808. DOI: 10.1134/S1062873824706639.

References:

1. Coey J.M.D. Perspective and prospects for rare earth permanent magnets, *Engineering*, 2020, vol. 6, issue 2, pp. 119-131. DOI: 10.1016/j.eng.2018.11.034.
2. Jha A.R. *Rare earth materials: properties and applications*, Boca Raton, London, New York, CRC Press, 2014, 371 p. DOI: 10.1201/b17045.
3. Liu S. Sm–Co high-temperature permanent magnet materials, *Chinese Physics B.*, 2019, vol. 28 issue 1, pp. 017501-1-017501-20. DOI: 10.1088/1674-1056/28/1/017501.
4. Golovnia O.A., Popov A.G., Mushnikov N.V. et al. Hard magnetic properties and the features of nanostructure of high-temperature Sm-Co-Fe-Cu-Zr magnet with abnormal temperature dependence of coercivity, *Nanomaterials*, 2023, vol. 13, issue 13, art. no. 1899, 14 p. DOI: 10.3390/nano13131899.
5. Duerrschabel M., Yi M., Uestuener K. et al. Atomic structure and domain wall pinning in samarium-cobalt-based permanent magnets, *Nature Communications*, 2017, vol. 8, issue 1, art. no. 54, 7 p. DOI: 10.1038/s41467-017-00059-9.
6. Semenova E.M., Lyakhova M.B., Ivanova A.I., Ulyanov M.N. Micro- and nanostructures of RCoCuFeZr heterogeneous alloys with high temperature stability, *Materials Science Forum*, 2016, vol. 845, pp. 46-49. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.845.46.
7. Horiuchi Y., Hagiwara M., Endo M., Sanada N., Sakurada S. Influence of intermediate-heat treatment on the structure and magnetic properties of iron-rich $\text{Sm}(\text{CoFeCuZr})_z$ sintered magnets, *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, issue 17, art. no. 17C704, 4 p. DOI: 10.1063/1.4906757.
8. Sepehri-Amin H., Thielsch J., Fischbacher J. et al. Correlation of microchemistry of cell boundary phase and interface structure to the coercivity of $\text{Sm}(\text{Co}_{0.784}\text{Fe}_{0.100}\text{Cu}_{0.088}\text{Zr}_{0.028})_{7.19}$ sintered magnets, *Acta Materialia*, 2017, vol. 126, pp. 1-10. DOI: 10.1016/j.actamat.2016.12.050.
9. Song K., Sun W., Chen H. et al. Revealing on metallurgical behavior of iron-rich $\text{Sm}(\text{Co}_{0.65}\text{Fe}_{0.26}\text{Cu}_{0.07}\text{Zr}_{0.02})_{7.8}$ sintered magnets, *AIP Advances*, 2017, vol. 7, issue 5, art. no. 056238, 7 p. DOI: 10.1063/1.4978464.
10. Dormidontov A.G., Kolchugina N.B., Dormidontov N.A., Milov Yu.V. Structure of alloys for $(\text{Sm,Zr})(\text{Co,Cu,Fe})_z$ permanent magnets: First level of heterogeneity, *Materials*, 2020, vol. 13, issue 17, art. no. 3893, 18 p. DOI: 10.3390/ma13173893.
11. Jiang C.B., An S.Z. Recent progress in high temperature permanent magnetic materials, *Rare Metals*, 2013, vol. 32, issue 5, pp. 431-440. DOI: 10.1007/s12598-013-0162-6.
12. Lyakhova M. B., Semenova E.M., Ivanov R.P. High-temperature behavior of hard magnetic alloys

(R,Zr)(Co,Cu,Fe)_z (R= Sm, Gd), *Metal Science and Heat Treatment*, 2015, vol. 56, issue 11-12, pp. 602-608. DOI: 10.1007/s11041-015-9807-4.

13. Lyakhova M.B., Semenova E.M., Rakunov P.A. et al. Структура i magnitnye svoistva splavov (R,Zr)(Co,Cu, Fe)_z (R = Sm, Gd) [Hysteresis structure and magnetic properties of (R, Zr)(Co, Cu, Fe)_z (R = Sm, Gd) alloys], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2023, issue 15, pp. 169-177. DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.169.

14. Semenova E. M., Lyakhova M. B., Rakunov P.A., Karpenkov A. Yu., Konyukhov Yu. V. Mechanisms of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Gd–Zr–Co–Cu–Fe Alloys, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2024, vol. 88, issue 5, pp. 802-808. DOI: 10.1134/S1062873824706639.

Original paper

Magnetic properties and magnetic reversal processes of the Sm-Gd-Zr-Co-Cu-Fe alloys

P.A. Rakunov, M.B. Lyakhova, E.M. Semenova, A.Yu. Karpenkov

Tver State University, Tver, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.258

Abstract: The results of experimental studies of magnetic properties and magnetization reversal processes of a series of alloys *Sm-Gd-Zr-Co-Cu-Fe* are presented. The studied samples were subjected to prolonged isothermal annealing for 24 hours, which made it possible to achieve the formation of a certain nanostructure that affects the hysteresis properties of the material and allows to achieve a high coercivity state. According to the magnetic measurements data obtained by the method of a vibrating magnetometer, the hysteresis loops are constructed, the dependence of the saturation magnetization, and the coercive force on chemical composition, and the values of the temperature coefficient of magnetization change depending on the relative content of *Sm* and *Gd* are determined. It is shown that the substitution of a part of samarium atoms for gadolinium atoms increases the effect of the mechanism of irreversible rotation of the spontaneous magnetization vector on the remagnetization of samples. Application of the studied samples in various devices puts serious demands on the stability of their magnetic properties at high temperatures. Our researches allow us to conclude that compounds with gadolinium concentration $x=0,5$ have the greatest coercive force, and compounds with gadolinium concentration in the range $x=0,5-0,6$ have the highest temperature stability.

Keywords: rare earth intermetallic compounds, hard magnetic materials, hysteresis, coercive force, magnetization, magnetization reversal processes.

Ракунов Павел Андреевич – аспирант 3 года обучения, ассистент кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Ляхова Марина Борисовна – к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник УНИ ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Семенова Елена Михайловна – к.ф.-м.н., доцент кафедры физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Карпенков Алексей Юрьевич – к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики конденсированного состояния, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Pavel A. Rakunov – 3rd year postgraduate student, Assistant, Condensed Matter Physic Department, Tver State University

Marina B. Lyakhova – Ph. D., Docent, Senior Researcher, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Elena M. Semenova – Ph. D., Docent, Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Alexey Yu. Karpenkov – Ph. D., Docent, Head of Condensed Matter Physics Department, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 01.09.2024; после рецензирования/reviced: 02.10.2024; принята/accepted 09.10.2024.