

DOI: 10.18721/JPM.12102

УДК 537.622: 539.378:620.186

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ ВЫСОКОМАГНИТОСТРИКЦИОННОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ САМАРИЙ-ЖЕЛЕЗО СО СТРУКТУРОЙ ФАЗ ЛАВЕСА

**Г.А. Политова^{1,2}, А.Ю. Карпенков³, Т.П. Каминская⁴,
М.А. Ганин¹, Рави Кумар⁵, А.В. Филимонов²**

¹ Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН,
Москва, Российская Федерация;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³ Тверской государственный университет, г. Тверь, Российская Федерация;

⁴ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, Российская Федерация;

⁵ Индийский технологический институт Мадраса, г. Ченнаи, Индия

В работе методом индукционной плавки получен сплав SmFe_2 в высокочистом однофазном состоянии. Методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии исследованы особенности поверхности сплава при комнатной температуре. Выявлено наличие неоднородной зернистой структуры, определены основные структурные элементы. Показано наличие сложной доменной структуры, проведено ее описание, определены размеры доменов. Представлены результаты рентгеноструктурных исследований в интервале температур 100 – 300 К. Получены и проанализированы экспериментальные данные по температурным зависимостям магнитострикции в магнитных полях до 1,2 Тл в области спин-переориентационного фазового перехода. Косвенно подтверждено существование «угловой» фазы, уточнены ее температурные границы.

Ключевые слова: редкоземельная фаза Лавеса, фазовый переход, магнитострикция, атомно-силовая микроскопия, магнитно-силовая микроскопия

Ссылка при цитировании: Политова Г.А., Карпенков А.Ю., Каминская Т.П., Ганин М.А., Кумар Рави, Филимонов А.В. Структура и фазовые превращения высокомагнитострикционного сплава системы самарий-железо со структурой фаз Лавеса // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 1. С. 28–38. DOI: 10.18721/JPM.12102

HIGH-MAGNETOSTRICTION LAVES-PHASE ALLOY OF THE SAMARIUM-IRON SYSTEM: THE STRUCTURE AND PHASE TRANSFORMATIONS

**G.A. Politova^{1,2}, A.Yu. Karpenkov³, T.P. Kaminskaya⁴,
M.A. Ganin¹, Ravi Kumar⁵, A.V. Filimonov²**

¹Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, Russian Federation;

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation;

³Tver State University, Tver, Russian Federation;

⁴Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation;

⁵Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India

In this study, the SmFe_2 alloy in a high-purity single-phase state has been prepared by the induction melting technique. The surface features of the alloy at room temperature were investigated using the atomic-force and magnetic-force microscopy. The forming of hetero-

geneous granular structure was revealed, the main structural elements were determined. The presence of the complex domain structure was shown, its description was presented and the domain sizes were found. The results of X-ray structural studies over the temperature range from 100 to 300 K were presented. The experimental data on the temperature dependences of magnetostriction in magnetic fields up to 1.2 T were obtained and analyzed in the region of the spin-reorientational phase transition. The existence of the “angular” phase was indirectly confirmed, its temperature boundaries were refined.

Keywords: rare-earth Laves phase, phase transition, magnetostriction, atomic force microscopy, structure

Citation: G.A. Politova, A.Yu. Karpenkov, T.P. Kaminskaya, M.A. Ganin, Ravi Kumar, A.V. Filimonov, High-magnetostriction Laves-phase alloy of the samarium-iron system: the structure and phase transformations, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (1) (2019) 28–38. DOI: 10.18721/JPM.12102

Введение

В последние годы возобновился интерес мирового научного сообщества к исследованиям сплавов со структурой фаз Лавеса типа RFe_2 (где R – редкоземельный металл (РЗМ)) [1 – 3]. Соединения редкоземельных и $3d$ -переходных металлов со структурой фаз Лавеса представляют собой важное семейство магнитных материалов, демонстрирующих большие значения анизотропной магнитострикции (порядка 10^{-3}) в сравнительно невысоких магнитных полях (менее 1 Тл) ниже температуры Кюри. Известно [4–6], что высокомагнитострикционные соединения способны преобразовывать электрическую энергию в механическую и применяются в таких устройствах, как приводы и датчики, работающие в различных средах и в широкой температурной области. В районе температуры Кюри некоторые фазы Лавеса могут демонстрировать как высокие значения магнитострикции, так и большой по величине магнитокалорический эффект, что также может найти практическое применение [7, 8]. Хотя физический механизм, ответственный за высокие значения магнитострикции в этих соединениях, известен [9, 10], однако комплексные исследования структуры и магнитных свойств, а также изучение аномалий в области фазовых переходов с помощью различных методик проводились фрагментарно (только для отдельных образцов).

Интерметаллические соединения RFe_2 кристаллизуются в кубическую структуру типа $MgCu_2$ пространственной группы $Fd\bar{3}m$. Согласно теории, в результате магнитного упорядочения наиболее вероятно появление огромной спонтанной магнитострикции вдоль направления легкого намагничивания $\langle 111 \rangle$. Особая симметрия

кубической фазы Лавеса $C15$ приводит к большому ромбоэдрическому искажению в направлении $\langle 111 \rangle$. Наиболее известные соединения фазы Лавеса с гигантской магнитострикцией насыщения при комнатной температуре – это $TbFe_2$ и $SmFe_2$ ($+1,7 \cdot 10^{-3}$ и $-1,5 \cdot 10^{-3}$, соответственно) [11 – 15]. Данные сплавы имеют близкие по абсолютной величине (однако разные по знаку) значения магнитострикции в области комнатной температуры. Оба эти сплава при переходе в магнитоупорядоченное состояние испытывают ромбоэдрические искажения, однако если в соединении $TbFe_2$ кубическая решетка вдоль направления $\langle 111 \rangle$ растягивается, то в $SmFe_2$ она, наоборот, слегка сжимается. Также данные соединения отличаются и типом магнитного упорядочения. Известно, что магнитные моменты подрешеток R и Fe параллельны, причем для легких РЗМ суммарные магнитные моменты подрешеток сонаправлены, в то время как для тяжелых – антипараллельны. Вследствие этого, $TbFe_2$ является ферримагнетиком, а $SmFe_2$ – ферромагнетиком.

В отличие от $TbFe_2$, кристаллическая структура $SmFe_2$, а также направление его магнитного момента изменяются с понижением температуры. С помощью мёссбауэровских и рентгенографических исследований было показано [15 – 18], что спонтанный магнитный момент соединения $SmFe_2$ при комнатной температуре ориентирован вдоль кристаллографического направления $\langle 111 \rangle$. Считалось, что при снижении температуры, в области $T = 180 - 200$ К наблюдается спин-переориентационный фазовый переход (СПП) и магнитные моменты ориентируются вдоль направления $\langle 110 \rangle$. Однако при детальном анализе дифракционных спектров, полученных при низких

температурах, было установлено [17, 18], что при понижении температуры примерно до 200 К структура сплава остается ромбоэдрической; при этом величина искажений увеличивается по абсолютной величине. При дальнейшем понижении температуры (в интервале 140 – 240 или 106 – 180 К, но данный интервал различен в литературных источниках), в сплаве появляется «угловая» магнитная фаза: вектор спонтанного магнитного момента находится в плоскости (110), не совпадая по направлению ни с $\langle 111 \rangle$, ни с $\langle 110 \rangle$. При низких температурах характер трансформации рентгенодифракционного спектра свидетельствует о возникновении ромбических искажений кристаллической решетки, а магнитный момент направлен вдоль оси $\langle 110 \rangle$. Аномалии в области СПП также проявляются на температурных зависимостях намагниченности [15].

Цель данной работы – проанализировать изменения кристаллической структуры и магнитоэлектрических свойств сплава SmFe_2 в интервале температур от 100 до 320 К, а также изучить особенности его поверхности при комнатной температуре методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии.

В связи с поставленной целью было необходимо получить сплав SmFe_2 в высокочистом однофазном состоянии.

Методика эксперимента

Изготовление образцов. Методом высокочастотной индукционной плавки (печь «Донец-1») был синтезирован сплав SmFe_2 в алуновом тигле в атмосфере особо чистого аргона (содержание влаги менее $0,02 \text{ г}\cdot\text{м}^{-3}$, азота – $0,0005 \%$, кислорода – $0,001 \%$), давление которого составляло 1,1 – 1,2 атм. В качестве исходных компонентов были взяты металлы высокой степени очистки. Экспериментально подобранное завышение в шихте содержания РЗМ на 10% позволило получить однофазные соединения после дальнейшего гомогенизирующего отжига. Скорость остывания сплавов была достаточно низкой (около 1 – 2 К/с), что способствовало достижению состояния, близкого к равновесному. Готовые образцы помещали в кварцевые ампулы, откачанные до высокого вакуума. Термическая обработка выплавленных сплавов проводилась по специально подобранному режиму с использованием трехзонной горизонтальной

трубчатой печи Carbolite TZF 15/610: образцы в ампулах нагревали до температуры 720°C со скоростью 7 К/мин, затем их выдерживали при этой температуре в течение 72 ч. После этого производилась их закалка в воду.

Регистрация рентгенодифракционных спектров. Проводилась на порошковых образцах в CuK_α -излучении ($\lambda = 0,1540598 \text{ нм}$) при комнатной температуре на рентгеновском дифрактометре «ДРОН-7», модифицированном системой быстрой регистрации на основе линейного стрипового позиционно-чувствительного детектора Mythen 1K (Dectris Ltd, Швейцария). Параметры элементарной ячейки определялись по отражениям в области углов $2\theta = 15 - 105^\circ$. Фазовый состав образца исследовался с помощью Ритвельд-анализа в программе Powder Cell 2.4. Температурные измерения дифрактограмм были выполнены с использованием фильтрованного MoK_α -излучения на рентгеновском дифрактометре SuperNova (Agilent) в диапазоне температур 110 – 250 К. Температуру образца контролировали путем его контакта с потоком газообразного азота заданной температуры, значение которой задавалось системой Oxford Cryosystems (Cobra Plus).

Микроскопия. Микроструктура образцов исследовалась на металлографическом микроскопе Neophot-30. Наблюдение и фотографирование производились при освещении ксеноновой лампой в режимах светлого поля или поляризованного света. Картины микроструктур выводились через оптический канал микроскопа на цифровую камеру высокого разрешения Levenhuk M800 Plus.

Анализ морфологии поверхности. Морфология поверхности образцов SmFe_2 исследовалась на шлифах методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) образцов фаз Лавеса, с использованием сканирующего зондового микроскопа Smena-A (платформа Solver, ЗАО НТ-МДТ, Россия), как в полуконтактной, так и в контактной модах, при комнатной температуре, с применением стандартных кремниевых кантилеверов типа HA_NC Etalon. Для выявления наноструктурированных особенностей поверхности образцы-шлифы подвергались травлению в 5%-м растворе азотной кислоты в спирте. Методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) исследования проводились на полностью размагниченных

образцах-шлифах с помощью специальных магнитных кантилеров MFM01 с хромокобальтовым покрытием, с резонансной частотой около 70 кГц и силовой константой 1 – 5 Н/м. Бесконтактная колебательная методика МСМ позволила получить большую чувствительность и высококачественные МСМ-изображения образцов. Для получения таких изображений поверхности была применена двухпроходная квазистатическая методика (максимум чувствительности метода достигается при совпадении частоты возбуждения кантилера с резонансной частотой системы зонд-образец).

Измерение деформации. Тензометрическим методом были исследованы деформации поликристаллического образца из сплава SmFe_2 в интервале температур от 100 до 320 К и в магнитных полях до 1,2 Тл. Измерения в магнитном поле проводились вдоль направления магнитного поля (продольная магнитострикция) и перпендикулярно ему (поперечная магнитострикция).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате проведенного синтеза методом высокочастотной индукционной плавки получены образцы сплава SmFe_2 . Сложность синтеза соединений RFe_2 заключается в близости точек эвтектики двух соединений RFe_2 и RFe_3 , что зачастую приводит к тому, что при недостатке в шихте редкоземельного металла R и неполном прохождении перитектической реакции, в сплаве кристаллизуется именно фаза 1 : 3, поскольку для ее образования необходимо меньшее количество атомов РЗМ. Анализ дифракционных данных, полученных при комнатной температуре (рис. 1) показал, что сплав однофазен по рентгенографическому признаку и атомно-кристаллическая структура изотипна структуре кубической фазы Лавеса C15 (MgCu_2). Найденное значение параметра решетки составило 7,4239 Å.

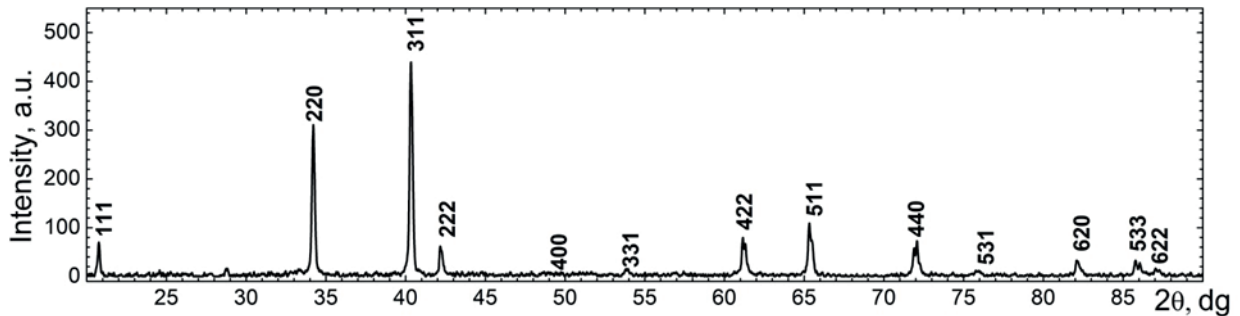


Рис. 1. Экспериментальная дифрактограмма сплава SmFe_2 ; цифры над пиками соответствуют индексам hkl; температура комнатная

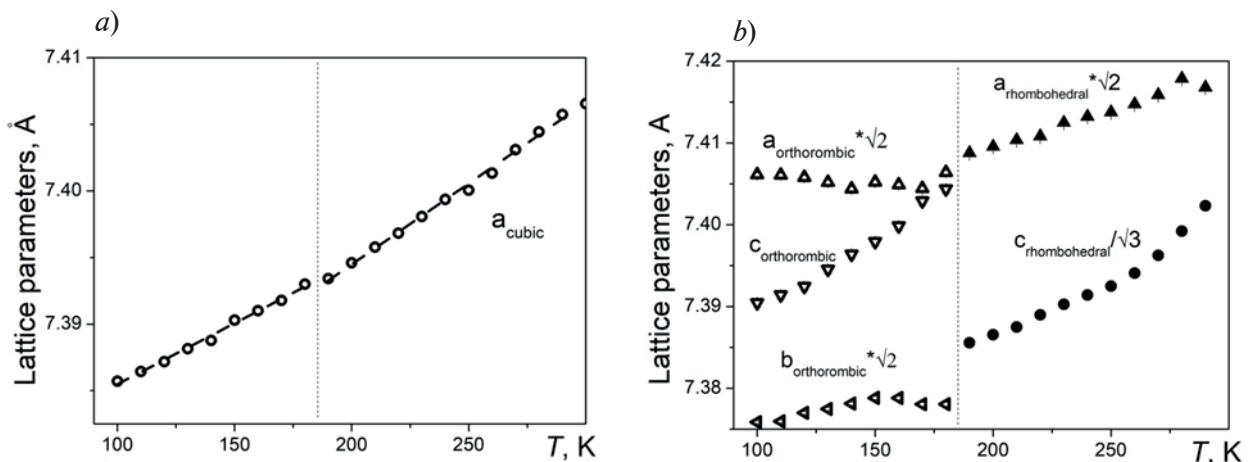


Рис. 2. Температурные зависимости параметров элементарной ячейки SmFe_2 : получены подгонкой рентгеновских дифракционных спектров в рамках модели кубической (a), а также ромбической (<180 К) и ромбоэдрической (> 190 К) решеток

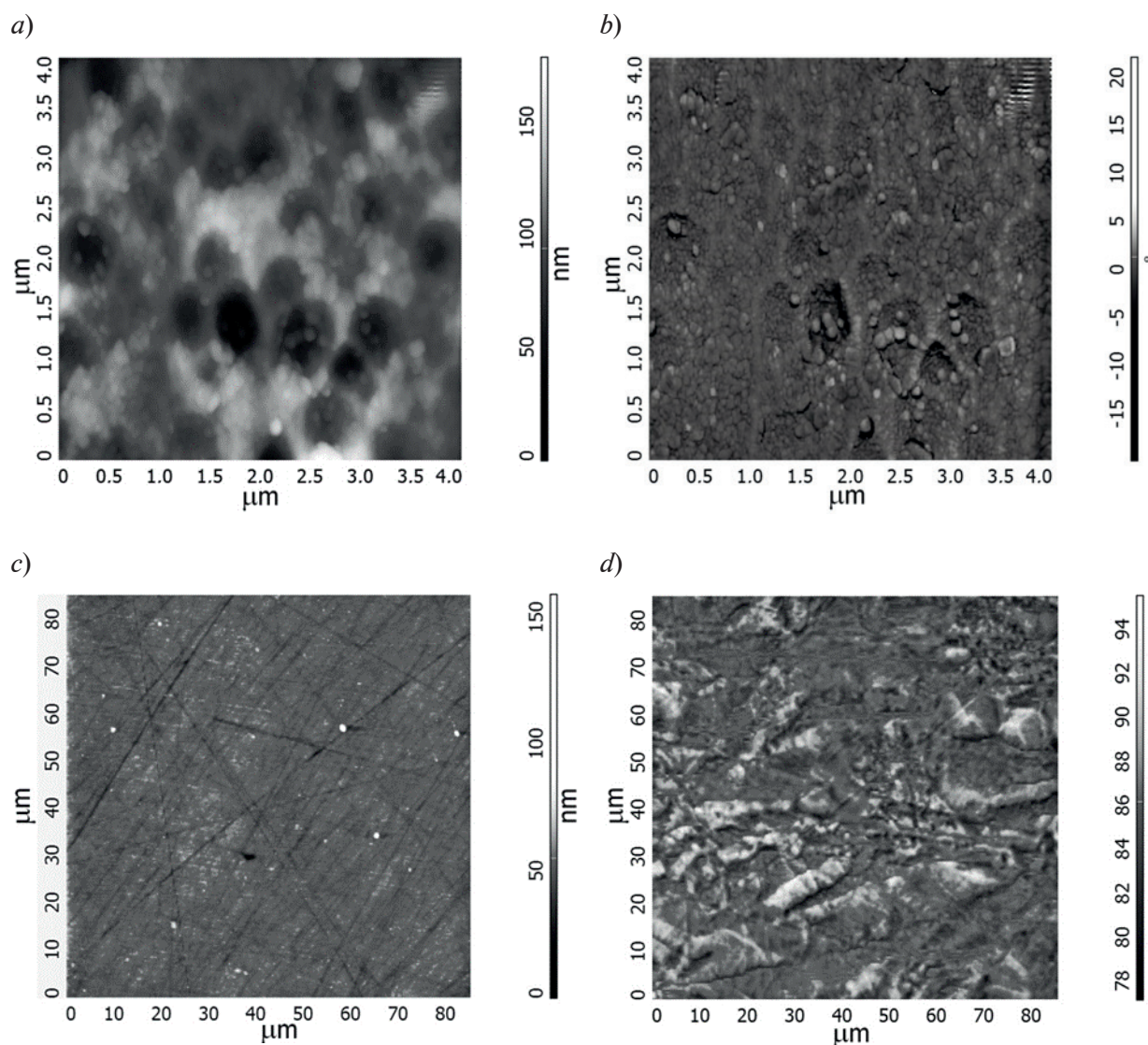


Рис. 3. АСМ (*a, b, c*)- и МСМ (*d*)-изображения поверхности сплава SmFe_2 , полученные при размерах скана 4×4 мкм (*a, b*) и 90×90 мкм (*c, d*); *b* – использован метод фазового контраста

Температурные зависимости параметров решетки (рис. 2,*a*) были получены путем подгонки дифракционных спектров в рамках модели кубической решетки. Видно, что в интервале температур 180 – 190 К происходит изменение наклона температурной зависимости параметра решетки; это свидетельствует об изменении кристаллической решетки, связанном с СПП. Полученные результаты хорошо согласуются с литературными данными [15 – 18], согласно которым в данной области температур происходит структурный переход из высокотемпературной ромбоэдрической фазы в угловую, которая далее переходит в низкотемпературную ромбическую фазу. Температурные зависимости параметров решетки *a, b, c*, полученные путем под-

гонки дифракционных спектров в рамках моделей ромбоэдрической (выше 190 К) и ромбической (орторомбической) (ниже 180 К) кристаллических решеток представлены на рис. 2,*b*. Для удобства сравнения на одном графике, параметры преобразованы (множители $\sqrt{2}, \sqrt{3}$) и приведены к псевдокубической ячейке.

Анализ микроструктуры оптическим методом выявил в образцах наличие второй фазы (она не была обнаружена рентгеновским методом). Количественный анализ микрофотографий, проведенный с помощью компьютерной программы, позволяющей по цветовым оттенкам пикселей рассчитать относительное содержание фаз, показал, что объемное содержание вторичных фаз не превышало 1 – 2 %, что

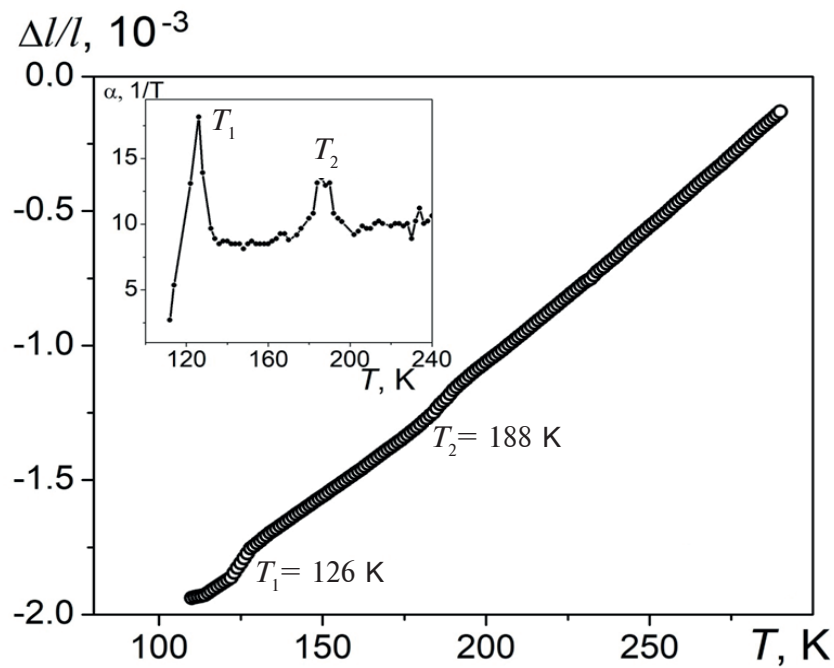


Рис. 4. Температурные зависимости относительного удлинения образца соединения SmFe_2 (тепловое расширение) и его коэффициента теплового расширения (на вставке); T_1 , T_2 — точки фазовых переходов

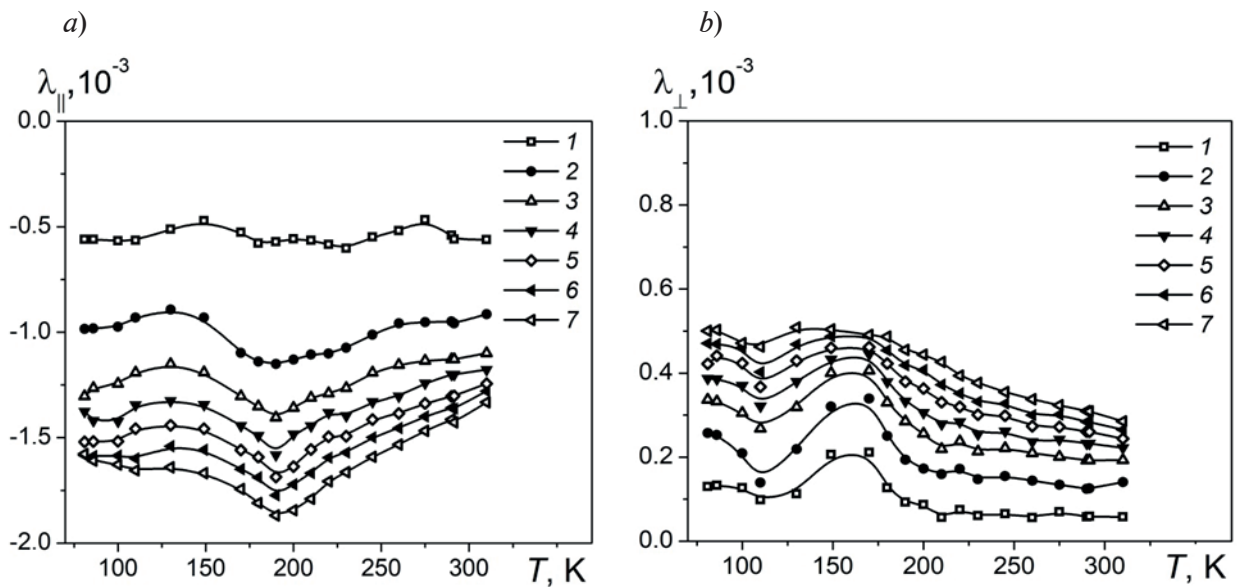


Рис. 5. Температурные зависимости продольной (a) и поперечной (b) магнитострикций SmFe_2 в магнитных полях со значениями индукции, Тл: 0,15 (1), 0,35 (2), 0,50 (3), 0,70 (4), 0,80 (5), 1,0 (6), 1,2 (7)

позволяет считать синтезированные соединения практически однофазными.

Методы атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии на современном этапе развития материаловедения становятся все более востребованными, поскольку позволяют получать дополнительную информацию об однородности фазового состава, зернистости синтезируемой фазы, размере и морфологии отдельных зерен, доменной структуре [19 – 21]. Исследования проводились в микронном, при размере скана 90×90 мкм (рис. 3, *d*), и наноразмерном, при размере 4×4 мкм (рис. 3, *a, b*) и менее, масштабах. Анализ АСМ-изображений топологии поверхности позволил установить, что образец SmFe_2 имеет неравномерно и неоднородно структурированную ячеистую поверхность с размерами данных структурных элементов (ячеек) от 500 до 700 нм в одном направлении и до 1 мкм в перпендикулярном направлении. Ячейки заполнены мелкими зернами (это другие структурные элементы) со средним размером 80 нм, что хорошо видно на рис. 3, *a*.

Исследования поверхности полированного шлифа SmFe_2 методом магнитно-силовой микроскопии (рис. 3, *d*) показывают наличие выраженной и довольно сложной доменной структуры: она состоит из островков с размерами от 6 до 12 мкм и полос шириной от 3 до 5 мкм. Наиболее мелкие домены имеют ширину 0,8 – 1,0 мкм. Такая сложная доменная структура на поверхности образца может быть обусловлена разными причинами, например наличием полей рассеяния (они связаны с напряжениями в образце), а также микровключений другой фазы. Присутствие напряжений вызвано, скорее всего, высокими магнитострикционными свойствами соединения SmFe_2 .

В данной работе были исследованы линейные деформации образцов SmFe_2 под действием внешнего магнитного поля, а также их зависимость от температуры (тепловое расширение). На рис. 4 показаны температурные зависимости относительного удлинения (тепловое расширение) и коэффициента теплового расширения объекта. Видно, что наблюдаются две аномалии при температурах 126 и 188 К. Данные аномалии связаны с фазовыми переходами, а именно: при $T_2 = 188$ К происходит переход из ромбоэдрической в «угловую» фазу, а при $T_2 = 126$ К «угловая» фаза пе-

реходит в ромбическую. Эти утверждения основаны на литературных данных [11, 12], а также на результатах наших рентгенографических исследований. Следует отметить, что если сведения о значении температуры T_2 мало различаются в разных литературных источниках, то значения T_1 различаются сильно. Таким образом, нами были уточнены значения указанных температурных точек путем измерения коэффициента теплового расширения образцов SmFe_2 в зависимости от температуры.

Еще более чувствительными к магнитным и структурным изменениям в образце оказываются магнитострикционные деформации, поэтому измерение магнитострикции удобно использовать как способ выявления магнитных и структурных фазовых переходов. На рис. 5 показаны температурные зависимости магнитострикции исследуемого сплава. В области температур 126 и 188 К наблюдаются аномалии как продольной (рис. 5, *a*), так и поперечной (рис. 5, *b*) магнитострикции при всех значениях приложенного магнитного поля, выраженные через минимум и максимум абсолютной величины магнитострикции, соответственно. Продольная магнитострикция SmFe_2 имеет отрицательный знак и максимальное абсолютное значение: $-1,9 \cdot 10^{-3}$, в то время как поперечная положительна и принимает максимальное значение, равное $+0,5 \cdot 10^{-3}$. В условиях комнатной температуры абсолютные величины магнитострикции снижаются, при этом значения продольной и поперечной составляющих равны, соответственно, $-1,4 \cdot 10^{-3}$ и $+0,3 \cdot 10^{-3}$.

Заключение

Индукционным методом синтезирован сплав SmFe_2 , комплексное исследование которого включало методы оптической металлографии и рентгеноструктурного анализа для подтверждения гомогенности и однофазности, в частности отсутствия фазы со стехиометрией 1 : 3, наиболее часто встречаемой в данных соединениях.

Методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии показано, что поверхность образца имеет неоднородно-структурированную ячеистую микроструктуру и сложную доменную структуру. Определены размеры основных структурных элементов.

Уточнены температурные границы су-



существования угловой фазы при переходе из ромбоэдрической в ромбическую фазу. Исследовано поведение магнитострикции в области этих аномалий.

Исследование выполнено при финансовой

поддержке РФФИ, проекты № 18-03-00798-а, № 16-52-48016 ИНД_оми (Кумар Рави и Филимонов А.В.), а также в рамках Госзадания Минобрнауки России, проект 11.5861.2017/БЧ (СПбПУ) и Государственного задания № 075-00746-19-00 (ИМЕТ РАН).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang N.J., Liu Y., Zhang H.W., Chen X., Li Y.X. Fabrication, magnetostriction properties and applications of Tb-Dy-Fe alloys: a review // *China Foundry*. 2016. Vol. 13. No. 2. Pp. 75–84.
2. Ren W.J., Zhang Z.D. Progress in bulk MgCu₂-type rare-earth iron magnetostrictive compounds // *Chin. Phys. B*. 2013. Vol. 22. No. 7. P. 077507.
3. Wang Y., Ma T.Y., Wu C., et al. Correlation between magnetostriction and magnetic structure in pseudobinary compounds Tb(Co_{1-x}Fe_x)₂ // *AIP Advances*. 2017. Vol. 7. No. 7. P. 075311.
4. Chu Z.Q., Pourhosseini-Asl M.J., Dong S.X. Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. Vol. 51. No. 24. P. 243001(21).
5. Kalgin A.V., Gridnev S.A., Popov I.I. Magnetoelectric effect in two-layered self-biased composites Tb_{0.12}Dy_{0.2}Fe_{0.68}/epoxy PbZr_{0.53}Ti_{0.47}O₃ // *Phys. Status Solidi. C*. 2017. Vol. 14. No. 3–4. P. 1600231.
6. Nikitin S.A., Tereshina I.S., Verbetsky V.N., Salamova A.A., Skokov K.P., Pankratov N.Yu., Skourski Yu.V., Tristan N.V., Zubenko V.V., Telegina I.V. Magnetostriction and magnetic anisotropy in TbFe₁₁TiH_x single crystal // *J. Alloys and Compounds*. 2001. Vol. 322. No. 1–2. Pp. 42–44.
7. Chzhan V.B., Tereshina I.S., Karpenkov A.Y., Tereshina-Chitrova E.A. Persistent values of magnetocaloric effect in the multicomponent Laves phase compounds with varied composition // *Acta Materialia*. 2018. Vol. 154. Pp. 303–310.
8. Tereshina I., Cwik J., Tereshina E., Politova G., Burkhanov G., Chzhan V., Ilyushin A., Miller M., Zaleski A., Nenkov K., Schultz L. Multifunctional phenomena in rare-earth intermetallic compounds with a Laves phase structure: Giant magnetostriction and magnetocaloric effect // *IEEE Trans. Mag.* 2014. Vol. 50. No. 11. P. 2504604.
9. Белов К.П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 159 с.
10. Tereshina I., Nikitin S., Tulyakov A., Opalenko A.A., Palewski T. Rare earth compounds with compensated magnetic anisotropy and giant magnetostriction // *J. Alloys Comp.* 2008. Vol. 451. No. 1–2. Pp. 481–483.
11. Samata H., Fujiwara N., Nagata Y., et al. Magnetic anisotropy and magnetostriction of SmFe₂ crystal // *J. Magn. Magn. Mater.* 1999. Vol. 195. No. 2. Pp. 376–383.
12. Grössinger R., Sato Turtelli R., Mehmood N. Materials with high magnetostriction // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2014. Vol. 60. P. 012002.
13. Tang Y.J., Luo H.L., Gao N.F., et al. Magnetic properties and magnetostriction in TbFe₂ compound with the addition of manganese or gallium // *Appl. Phys. Lett.* 1995. Vol. 66. No. 3. Pp. 388–390.
14. Tang Y.M., Chen L.Y., Zhang L., Huang H.F., Xia W.B., Zhang S.Y., Wei J., Tang S.L., Du Y.W. Temperature dependence of the magnetostriction in polycrystalline PrFe_{1.9} and TbFe₂ alloys: Experiment and theory // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115. No. 17. P. 173902.
15. Liu X.N., Lin K., Gao Q.L., et al. Structure and phase transformation in the giant magnetostriction Laves-phase SmFe₂ // *Inorganic Chemistry*. 2018. Vol. 57. No. 2. Pp. 689–694.
16. Atzmony U., Dariel M.P. Nonmajor cubic axes of easy magnetization in rare-earth-iron Laves compounds // *Phys. Rev. B*. 1976. Vol. 13. No. 9. Pp. 4006–4014.
17. Gaviko V.S., Korolyov A.V., Mushnikov N.V. X-ray diffraction investigation of spin reorientation in SmFe₂ // *J. Magn. Magn. Mater.* 1996. Vol. 157–158. May. Pp. 659–660.
18. Илюшин А.С., Солодов Е.В., Умхаева З.С. Структурные и магнитные превращения в сплавах псевдобинарной системы (Sm_{1-x}Tb_x)Fe₂ // *Перспективные материалы*. 2013. № 11. С. 42 – 47.
19. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. Нижний Новгород: Институт физики микроструктур РАН, 2004. 110 с.

20. Политова Г.А., Бурханов Г.С., Терешина И.С., Каминская Т.П., Чжан В.Б., Терешина Е.А. Влияние легирования алюминием и железом на структуру, магнитные и магнитокалорические свойства многокомпонентных сплавов Tb-Dy-Fe-Co // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 4. С. 557–562.

21. Андреева Н.В., Филимонов А.В., Рудской А.И., Бурханов Г.С., Терешина И.С., Политова Г.А., Пелевин И.А. Исследование наноструктурированных магнитотвердых материалов системы Nd-Fe-Co-B методами атомно-силовой и магнитно-силовой микроскопии // ФТТ. 2016. Т. 58. № 9. С. 1798–1805.

Статья поступила в редакцию 01.02.2019, принята к публикации 05.02.2019.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ПОЛИТОВА Галина Александровна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Российская Федерация.

119334 Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр., 49
gpolitova@gmail.com

КАРПЕНКОВ Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированного состояния Тверского государственного университета, г. Тверь, Российская Федерация.

170002 Российская Федерация, г. Тверь, Садовый пер., 35
karpenkov_alex@mail.ru

КАМИНСКАЯ Татьяна Петровна – кандидат технических наук, доцент, научный сотрудник кафедры общей физики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация.

119999 Российская Федерация, г. Москва, Ленинские горы, 1
ktp53@mail.ru

ГАНИН Максим Алексеевич – младший научный сотрудник Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Российская Федерация.

119334 Российская Федерация, г. Москва, Ленинский пр., 49
ganmax_90@mail.ru

КУМАР РАВИ – доктор естественных наук, профессор Лаборатории машиностроительной керамики Индийского технологического института Мадраса, г. Ченнаи, Индия.

Chennai (Madras), 600036, India
nvrk@iitm.ac.in

ФИЛИМОНОВ Алексей Владимирович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической электроники Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
filimonov@rphf.spbstu.ru

REFERENCES

[1] N.J. Wang, Y. Liu, H.W. Zhang, et al., Fabrication, magnetostriction properties and applications of Tb-Dy-Fe alloys: a review, China Foundry. 13 (2) (2016) 75–84.

[2] W.J. Ren, Z.D. Zhang, Progress in bulk MgCu₂-type rare-earth iron magnetostrictive

compounds, Chin. Phys. B. 22 (7) (2013) 077507.

[3] Y. Wang, T.Y. Ma, C. Wu, et al., Correlation between magnetostriction and magnetic structure in pseudobinary compounds Tb(Co_{1-x}Fe_x)₂, AIP Advances. 7 (7) (2017) 075311.

[4] Z.Q. Chu, M.J. Pourhosseini-Asl, S.X. Dong,

- Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51 (24) (2018) 243001(21).
- [5] **A.V. Kalgin., S.A. Gridnev, I.I. Popov,** Magnetoelectric effect in two-layered self-biased composites $\text{Tb}_{0.12}\text{Dy}_{0.2}\text{Fe}_{0.68}/\text{epoxy PbZr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47}\text{O}_3$, *Phys. Status Solidi, C* 14 (3–4) (2017) 1600231.
- [6] **S.A. Nikitin, I.S. Tereshina, V.N. Verbetsky, et al.,** Magnetostriction and magnetic anisotropy in $\text{TbFe}_{11}\text{TiH}_x$ single crystal, *J. Alloys and Compounds*. 322 (1–2) (2001) 42–44.
- [7] **V.B. Chzhan, I.S. Tereshina, A.Y. Karpenkov, E.A. Tereshina-Chitrova,** Persistent values of magnetocaloric effect in the multicomponent Laves phase compounds with varied composition, *Acta Materialia*. 154 (2018) 303–310.
- [8] **I. Tereshina, J. Cwik, E. Tereshina, et al.,** Multifunctional phenomena in rare-earth intermetallic compounds with a Laves phase structure: Giant magnetostriction and magnetocaloric effect, *IEEE Trans. Mag.* 50 (11) (2014) 2504604.
- [9] **K.P. Belov,** Magnitostriksionniye yavleniya i ikh technicheskiye prilozheniya [Magnetostriction phenomena and their technical applications], Nauka, Moscow, 1987.
- [10] **I. Tereshina, S. Nikitin, A. Tulyakov, et al.,** Rare earth compounds with compensated magnetic anisotropy and giant magnetostriction, *J. Alloys Comp.* 451 (1–2) (2008) 481–483.
- [11] **H. Samata, N. Fujiwara, Y. Nagata, et al.,** Magnetic anisotropy and magnetostriction of SmFe_2 crystal, *J. Magn. Magn. Mater.* 195 (2) (1999) 376–383.
- [12] **R. Grössinger, R.S. Turtelli, N. Mehmood,** Materials with high magnetostriction, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 60 (2014) 012002.
- [13] **Y.J. Tang, H.L. Luo, N.F. Gao, et al.,** Magnetic properties and magnetostriction in TbFe_2 compound with the addition of manganese or gallium, *Appl. Phys. Lett.* 66 (3) (1995) 388–390.
- [14] **Y.M. Tang, L.Y. Chen, L. Zhang, et al.,** Temperature dependence of the magnetostriction in polycrystalline $\text{PrFe}_{1.9}$ and TbFe_2 alloys: experiment and theory, *Journal of Applied Physics*. 115 (17) (2014) 173902.
- [15] **X.N. Liu, K. Lin, Q.L. Gao, et al.,** Structure and phase transformation in the giant magnetostriction Laves-phase SmFe_2 , *Inorganic Chemistry*. 57 (2) (2018) 689–694.
- [16] **U. Atzmony, M.P. Dariel,** Nonmajor cubic axes of easy magnetization in rare-earth-iron Laves compounds, *Phys. Rev. B*. 13 (9) (1976) 4006–4014.
- [17] **V.S. Gaviko, A.V. Korolyov, N.V. Mushnikov,** X-ray diffraction investigation of spin reorientation in SmFe_2 , *J. Magn. Magn. Mater.* 157–158 (May) (1996) 659–660.
- [18] **A.C. Ilyushin, E.V. Solodov, Z.S. Umkhayeva,** Structural and spin-orientation phase transitions in pseudobinary $(\text{Sm}_{1-x}\text{Tb}_x)\text{Fe}_2$ system, *Journal Perspektivnye materialy*. (11) (2013) 42–47.
- [19] **V.I. Mironov,** Osnovy skaniruyushchey zondovoy mikroskopii [Principles of scanning probe microscopy], Institute for Physics of Microstructures of the RAN, Nizhni Novgorod, 2004.
- [20] **G.A. Politova, G.S. Burkhanov, I.S. Tereshina, et al.,** The effect of adding aluminum and iron to Tb-Dy-Ho-Co multialloys on their structure, magnetic and magnetocaloric properties, *Technical Physics*. 62 (4) (2017) 577–582.
- [21] **N.V. Andreeva, A.V. Filimonov, A.I. Rudskoi, et al.,** A study of nanostructure magnetosolid Nd-Ho-Fe-Co-B materials via atomic force microscopy and magnetic force microscopy, *Physics of the Solid State*. 58 (9) (2016) 1862–1869.

Received 01.02.2019, accepted 05.02.2019.

THE AUTHORS

POLITOVA Galina A.

Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS
49 Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russian Federation
gpolitova@gmail.com

KARPENKOV Aleksey Yu.

Tver State University
35 Sadovaya, 170002, Tver, Russian Federation
karpenkov_alex@mail.ru

KAMINSKAYA Tatiana P.

Lomonosov Moscow State University

GSP-1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russian Federation
ktp53@mail.ru

GANIN Maksim A.

Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS

49 Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russian Federation
ganmax_90@mail.ru

KUMAR RAVI

Indian Institute of Technology Madras

Chennai (Madras), 600036, India
nvrk@iitm.ac.in

FILIMONOV Alexey V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russian Federation
filimonov@rphf.spbstu.ru