

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ  
СВОЙСТВА

УДК 537.634.2

НАМАГНИЧЕННОСТЬ И МАГНИТОСТРИКЦИЯ  
СПЛАВОВ  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ )  
В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

© 2023 г. Н. З. Абдулкадирова<sup>a, \*</sup>, А. Г. Гамзатов<sup>a</sup>, А. Б. Батдалов<sup>a</sup>,  
К. И. Камилов<sup>a, b</sup>, А. М. Алиев<sup>a</sup>, Р. Gebara<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, ул. М. Ярагского, 94, Махачкала, 367030 Россия

<sup>b</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет,  
ул. Колмогорова, 1, Москва, 119992 Россия

<sup>c</sup>Institute of Physics, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, 42-200 Poland

\*e-mail: nnurizhat@mail.ru

Поступила в редакцию 09.06.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 07.08.2023 г.

Измерены намагниченность и магнитострикция поликристаллических сплавов  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в импульсных магнитных полях до 180 кЭ в интервале температур 80–270 К. Замещение атомов Fe атомами Mn сдвигает  $T_C$  в сторону низких температур и не сказывается на величине намагниченности насыщения. Наблюдаемая полевая зависимость намагниченности  $M(H)$  вблизи  $T_C$  характерна для фазовых переходов второго рода, в то время как температурная зависимость намагниченности  $M(T)$  выше  $T_C$  в сильных магнитных полях указывает на магнитный фазовый переход первого рода. Магнитообъемный эффект  $\Delta V/V$  достигает 0.81% в поле 180 кЭ. Асимметрия магнитострикции относительно температуры максимума эффекта, проявляющаяся в сильных магнитных полях, и магнитолевой гистерезис магнитострикции носят признаки фазового перехода первого рода.

*Ключевые слова:* намагниченность, магнитострикция, магнитное поле

DOI: 10.31857/S001532302360096X, EDN: JXEVKZ

ВВЕДЕНИЕ

Физические свойства материалов, в которых заложен прикладной потенциал, всегда находятся в фокусе внимания исследователей. Ферромагнитные сплавы на основе  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$ , обладающие рядом уникальных физических свойств, относятся к такому классу материалов. В  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$  наблюдается гигантский магнитокалорический эффект (МКЭ) в относительно слабых магнитных полях, гигантские значения магнитострикции, управляемый метамагнитный фазовый переход и т.д.

В последнее время интерес к магнитокалорическим материалам возрос в связи с возможностью их практического применения в технологии магнитного охлаждения [1–7]. Исследования физических свойств таких сплавов, кроме чисто прикладных, представляют и значительный академический интерес, так как в комплексе с исследованиями других свойств позволяют получить дополнительные сведения о природе магнитного упорядочения, о взаимосвязи магнитных, упругих и тепловых характеристик магнитных сплавов и т.д.

В одной из первых работ по изучению магнитокалорических свойств сплава на основе  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$  приводятся результаты исследования намагниченности и магнитокалорического эффекта состава  $\text{LaFe}_{11.4}\text{Si}_{1.6}$  [6]. Было показано, что фазовый переход (ФП) при  $T_C = 208$  К является обратимым, а изменение магнитной энтропии  $\Delta S_M$  достигает гигантских значений, достигающих  $\sim 19.4$  Дж/кг К при  $\Delta H = 50$  кЭ, что превышает величины, ранее достигнутые для материалов с обратимым магнитным фазовым переходом. В этой же работе было показано, что колоколообразный максимум на кривой  $\Delta S_M(T)$  вблизи  $T_C$  в сильных магнитных полях носит асимметричный характер, что является следствием метамагнитной природы фазового перехода в магнитном поле выше  $T_C$ . В последующих многочисленных публикациях, посвященных исследованиям физических свойств различных композиций сплавов на основе  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ , эти результаты были воспроизведены с различного рода тонкостями, связанными с конкретизацией состава, значениями и типами магнитных по-

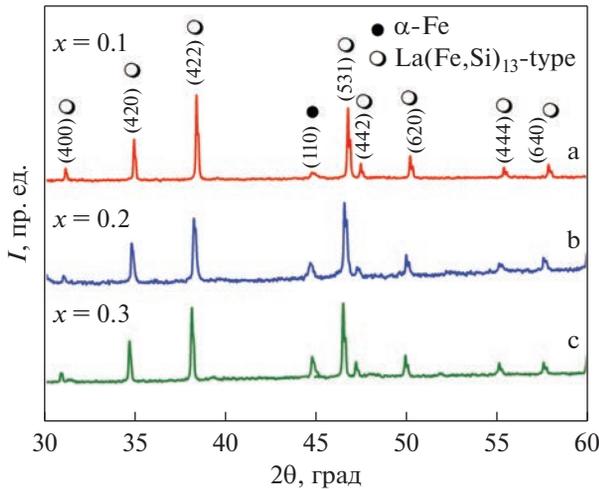


Рис. 1. XRD анализ для  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ).

лей (стационарные, импульсные, переменные), методами получения и т.д. [7–11].

В исходной композиции сплава  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$  при понижении температуры вблизи  $T_C$  происходит резкое увеличение объема элементарной ячейки (магнитообъемный эффект) и рост намагниченности, что классифицируется как метамагнитный фазовый переход первого рода [6]. Привлекательным с точки зрения прикладных перспектив качеством сплавов на основе  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$  является возможность регулировать температуру фазового перехода в широкой области температур. Этого можно добиться как путем изменения соотношения основных компонент базовой фазы  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ , так и с помощью разного рода замещений и легирования [12–14].

В ряде работ приводятся результаты исследования влияния замещения атомов La атомами других редкоземельных металлов Ce, Pr. Но на магнитные и магнитокалорические свойства и структуру сплава  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$  [15, 16]. Радикальных отличий свойств от состава с La не обнаружено. Влияние частичного замещения атомов Fe атомами Mn на магнитные и магнитокалорические свойства сплава  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  было исследовано в работе [17] и показано, что увеличение концентрации марганца приводит к уменьшению  $T_C$ , что коррелирует с уменьшением постоянной решетки основной фазы  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ .

Такие замечательные свойства сплавов на основе  $\text{La}(\text{FeSi})_{13}$ , как рекордные значения изменения магнитной энтропии, гигантское отрицательное тепловое расширение, метамагнитный фазовый переход выше  $T_C$ , регулируемые температуры фазового перехода являются следствием глубокой взаимосвязи магнитных, электронных и ре-

шеточных свойств магнитных сплавов. Комплексные исследования магнитных, магнитоупругих и магнитокалорических свойств сплавов могут способствовать пониманию природы таких взаимодействий.

В данной работе приводятся результаты исследования намагниченности и магнитострикции слабо замещенных сплавов  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в импульсных магнитных полях до 180 кЭ в интервале температур 80–350 К.

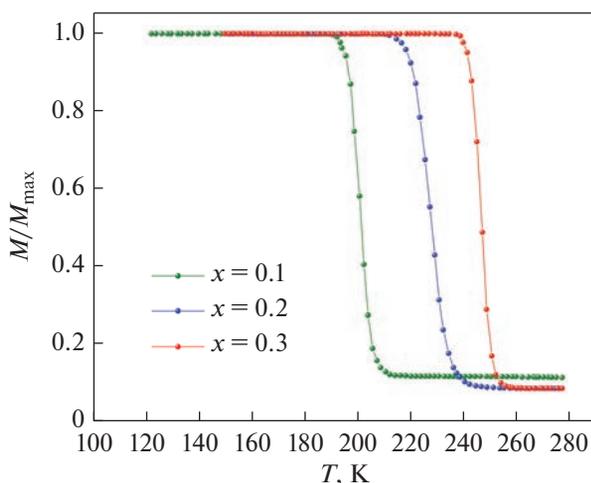
## ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТ

Образцы  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  были синтезированы путем дуговой плавки высокочистых компонент сплава под низким давлением Ar. Слитки переплавляли несколько раз, чтобы обеспечить их однородность. Впоследствии образцы были запаяны в кварцевые ампулы при низком давлении Ar и отожжены при 1323 К в течение 15 дней. Фазовый состав изучали с помощью рентгеновского дифрактометра Bruker D8 Advance с  $\text{CuK}\alpha$ -излучением. XRD был подтвержден анализом Ритвельда с использованием пакета PowderCell 2.4 [17]. Рентгеноструктурные данные показывают, что кроме основной фазы есть паразитная фаза альфа-железа объемом 8–10% для образцов с  $x = 0.1, 0.2$  и 0.3 соответственно (рис. 1).

Для получения сильных импульсных магнитных полей (до 200 кЭ) использовали батареи конденсаторов емкостью 0.003 Ф и длительностью импульса 5 мс. Измерения намагниченности выполнены индукционным методом с использованием дифференциальных катушек. В этом методе две катушки с равным произведением nS расположены вблизи друг друга, помещены в канал соленоида и включены так, чтобы возникающие в них Э.Д.С. компенсировались. Если в одной из катушек находится исследуемый образец, то при его намагничивании в импульсном магнитном поле с катушек снимается Э.Д.С., которая после интегрирования оказывается пропорциональной магнитному моменту образца.

Измерения магнитострикции в сильных импульсных полях проводили методом контактного пьезоэлектрического датчика. В качестве пьезоэлектрического датчика магнитострикции использовали тонкие металлизированные с двух сторон пластинки X – срез монокристалла кварца. Сигнал, снимаемый с пьезодатчика и пропорциональный магнитострикции, подавали на зарядовый усилитель и далее на один из входов АЦП.

Исследования исходной композиции  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  показали, что сплав переходит в ферромагнитное состояние при  $T_C = 274$  К [19]. Переход в ферромагнитную фазу сопровождается скачкообразным изменением размеров элементарной ячейки, что является причиной резкого

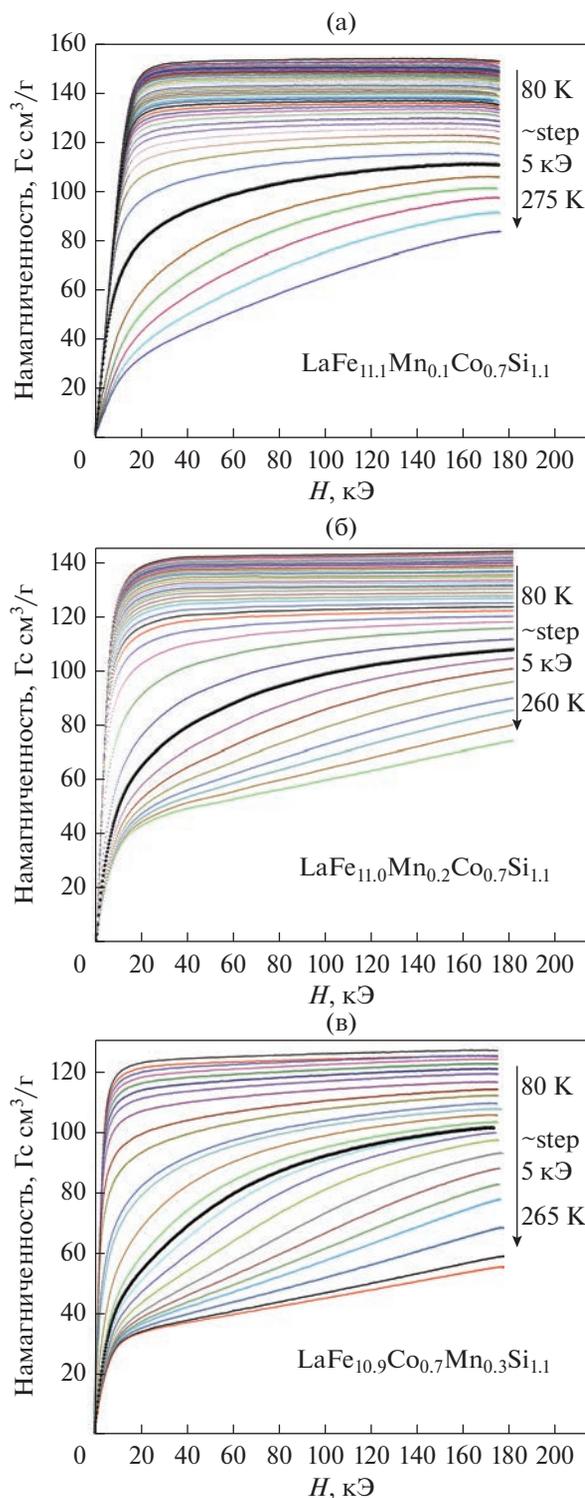


**Рис. 2.** Температурная зависимость приведенной намагниченности для  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в магнитном поле 100 Э.

увеличения намагниченности при понижении температуры. Аналогичная картина наблюдается и для замещенных образцов. Температурные зависимости приведенной намагниченности в поле 100 кЭ приведены на рис. 2. Как видно из рисунка, частичное замещение атомов Fe атомами Mn приводит к смещению  $T_C$  в сторону низких температур:  $T_C = 241, 222, 198$  К для образцов с  $x = 0.1, 0.2$  и  $0.3$  соответственно. Температура Кюри определена по максимуму производной  $dM/dT$ .

Замещение атомов Fe с радиусом  $r_{\text{Fe}} = 1.24 \text{ \AA}$  атомами парамагнитного металла Mn с большим радиусом  $r_{\text{Mn}} = 1.37 \text{ \AA}$  означает уменьшение расстояния между атомами Fe, между которыми осуществляется обменное взаимодействие и, как следствие, уменьшение  $T_C$ . Быстрый рост намагниченности при  $T_C$  связан с резким увеличением размеров элементарной ячейки при понижении температуры. Уменьшение параметров решетки системы  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  с увеличением концентрации Mn следует также из данных рентгеноструктурного анализа, где постоянная решетки  $a$  равна 11.4745, 11.4708 и 11.4676 Å соответственно для  $x = 0.1, 0.2$  и  $0.3$ .

Полевые зависимости намагниченности соединений  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  были измерены в импульсных магнитных полях до 180 кЭ в интервале температур 80–275 К с шагом 5 К. Протокол измерений был следующим: образец охлаждали до азотных температур, нагревали до нужной температуры и включали магнитное поле с длительностью импульса 5 мс, что соответствует скорости развертки поля 36000 кЭ/с. Далее нагревали образец с шагом 5 К при следующей нужной температуре. Измерения проводили в режиме нагрева.



**Рис. 3.** Полевые зависимости намагниченности образцов  $\text{LaFe}_{11.1-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в интервале температур 80–275 К с шагом 5 К в импульсных полях до 180 кЭ.

Как видно из рис. 3, при температурах ниже  $T_C$  ( $M(H)$ , измеренная при  $T_C$ , выделена черной жирной линией) наблюдается резкий рост намагни-

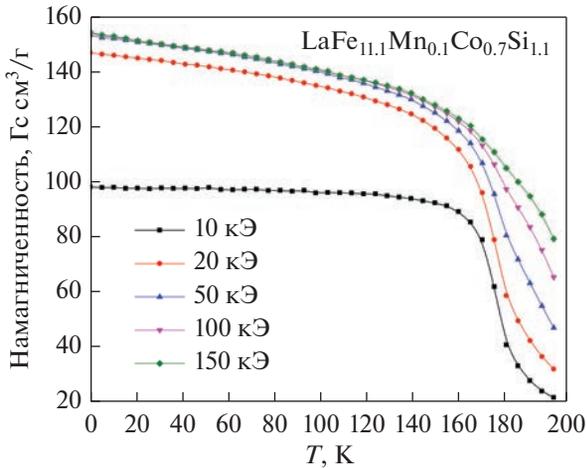


Рис. 4. Температурная зависимость намагниченности в различных магнитных полях для сплава  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ .

ченности в слабых полях с выходом на насыщение при увеличении магнитного поля, а сами значения намагниченности достигают величин 140–150  $\text{Gs cm}^3/\text{г}$ . При  $T > T_C$  намагниченность плавно растет, и чем дальше температура измерений от  $T_C$ , тем более пологий ход  $M(H)$ .

Данные  $M(H)$  показывают, что мы имеем дело с фазовым переходом второго рода. Нет явных признаков метамагнитного фазового перехода, присущего данным сплавам в виде ступеньки на зависимости  $M(H)$  вблизи критического поля [20] в слабых полях.

Данные по  $M(H, T)$  можно использовать для построения графиков зависимости намагниченности от температуры  $M(T)$ . Как видно из рис. 4, зависимость  $M(T)$  имеет вид, характерный для фазовых переходов второго рода: рост намагниченности с понижением температуры ниже  $T_C$  с выходом на насыщение. Однако выше  $T_C$  наблюдается сильная зависимость намагниченности от магнитного поля, что не характерно для классических фазовых переходов второго рода. Сильная зависимость  $M$  от  $H$  выше  $T_C$  для сплава  $\text{La}(\text{Fe}_{0.88}\text{Si}_{0.12})_{13}$  была обнаружена авторами [12], которые связывают наблюдаемое явление с метамагнитным фазовым переходом первого рода.

Как отмечали выше, большие значения изменения магнитной энтропии в сплавах  $\text{La-Fe-Si}$  являются следствием гигантских магнитообъемных эффектов, где изменение объема решетки может достигать  $\sim 1\%$  [9, 20, 21].

Экспериментальные кривые зависимости магнитострикции сплавов  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в импульсных магнитных полях до 180 кЭ приведены на рис. 5. Измерения магнитострикции выполнены в продольной конфигурации, т.е. в поле, параллельном направлению изменения длины образца  $\Delta l/l$ .

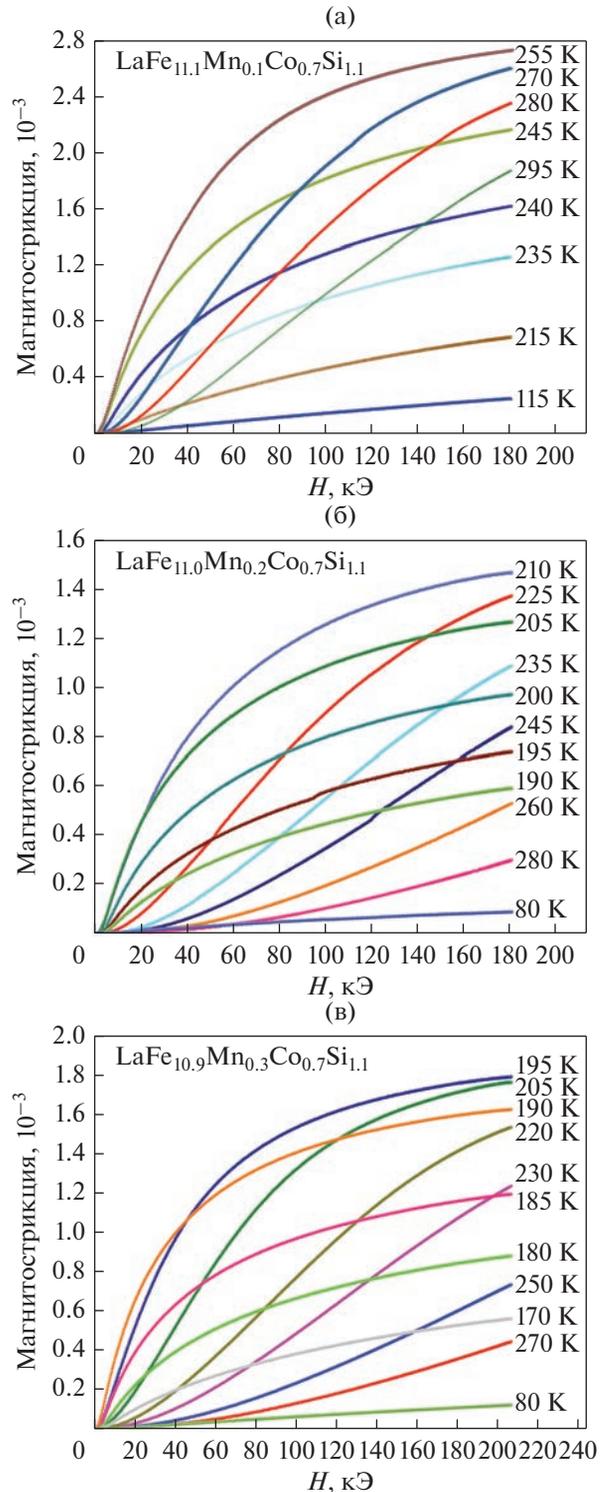
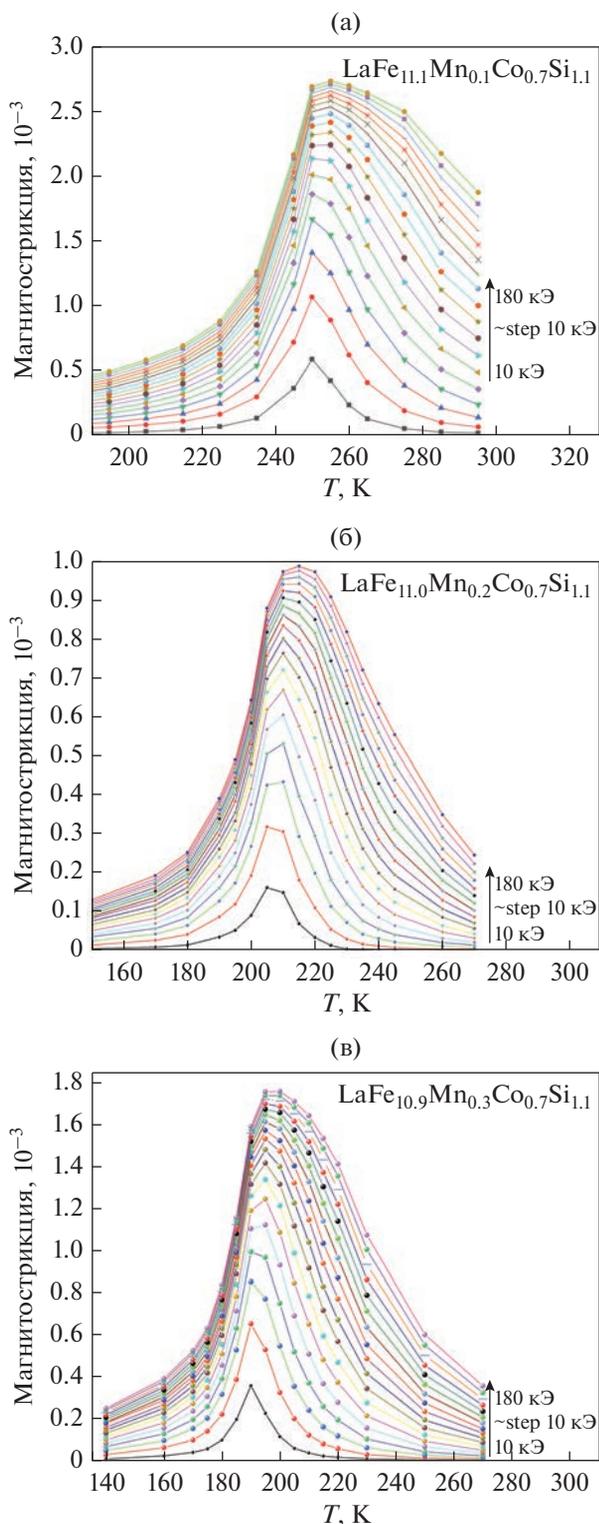


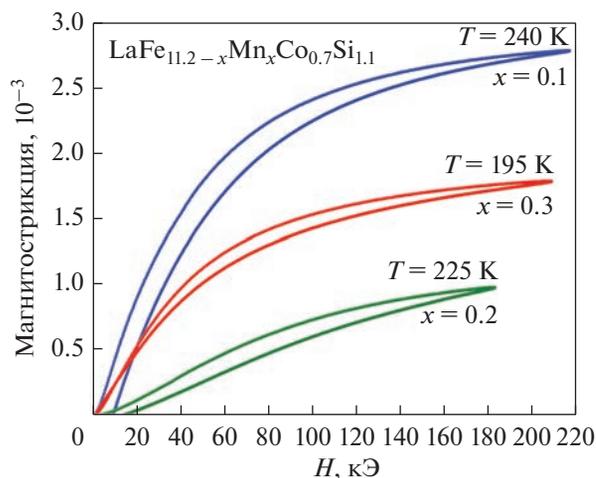
Рис. 5. Магнитополевые зависимости магнитострикции для образцов  $\text{LaFe}_{11.1-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в интервале температур 80–275 К в импульсных полях до 210 кЭ.

Как видно из рисунка, максимальные значения магнитострикции наблюдаются вблизи температуры фазовых переходов  $T_C$  и имеют тенден-



**Рис. 6.** Температурные зависимости магнитострикции для образцов  $\text{LaFe}_{11.1-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в импульсных магнитных полях до 180 кЭ.

ции к насыщению в сильных магнитных полях. Аналогичная зависимость намагниченности от магнитного поля вблизи  $T_C$  (см. рис. 3) указывает



**Рис. 7.** Магнитострикция в режиме роста и убывания поля для образцов  $\text{LaFe}_{11.1-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в импульсных магнитных полях до 220 кЭ.

на единую природу механизма, лежащего в основе наблюдаемой зависимости  $\Delta l/l_0(H)$  и  $M(H)$ . Изменившиеся под влиянием  $H$  магнитные взаимодействия индуцируют изменение сил межатомного взаимодействия, что приводит к гигантской магнитострикции, достигающей в поле 180 кЭ значений  $\sim 0.15\text{--}0.27\%$ . На глубокую взаимосвязь магнитных и структурных свойств сплава La–Fe–Si указывают и результаты работы [20], где показано, что вблизи  $T_C$  наблюдается линейная связь между  $\Delta l/l$  и  $M^2$ .

Используя экспериментальные данные зависимости  $M(H)$  для разных значений магнитного поля (рис. 5), мы построили графики зависимости магнитострикции от температуры для разных  $H$  (рис. 6). Температурные зависимости магнитострикции проявляют явную асимметрию в расширении зависимости  $\Delta l/l(T)$  и смещении пика в сторону высоких температур с ростом магнитного поля. Эти особенности также указывает на метамгнитную природу фазового перехода в сильных магнитных полях в окрестности  $T_C$  [7, 17].

Следует обратить внимание на отсутствие прямой связи между величиной  $\Delta l/l_0$  и уровнем замещения марганцем. С ростом  $x$   $(\Delta l/l)_{\max}$  сначала убывает от 2.7 до 0.98, а затем при  $x = 0.3$  снова возрастает до 1.75. Достаточно весомым аргументом в пользу метамгнитной природы фазового перехода вблизи  $T_C$  являются магнитные гистерезисы, наблюдаемые на зависимости магнитострикции от напряженности приложенного поля в режиме нагрева и охлаждения, приведенные на рис. 7.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования намагниченности и магнитоstriction ферромагнитного сплава  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) в импульсных магнитных полях до 180 кЭ в широкой области температур 80–275 К.

Показано, что слабое замещение атомов Fe атомами Mn приводит к уменьшению  $T_C$  от 247 до 198 К и не вызывает кардинальных изменений в поведении исследуемых коэффициентов.

Магнитолевая и температурная зависимость намагниченности вблизи  $T_C$  в слабых полях соответствуют фазовому переходу второго рода, в то время как поведение  $M(T)$  и  $\Delta l/l_0(T, H)$  в сильных магнитных полях указывают на метамагнитную природу фазового перехода первого рода.

Работа выполнена в рамках госзадания FMSW-2022-0006.

У авторов нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский В.В., Мирошкина О.Н., Бучельников В.Д., Марченков В.В. Магнитокалорический эффект в металлах и сплавах // ФММ. 2022. Т. 123. № 4. С. 339–343.
2. Соколовский В.В., Мирошкина О.Н., Бучельников В.Д. Обзор современных теоретических методов исследования магнитокалорических материалов // ФММ. 2022. Т. 123. № 4. С. 344–402.
3. Abdulkadirova N.Z., Gamzatov A.G., Kamilov K.I., Kadirbardeev A.T., Aliev A.M., Popov Y.F., Vorob'ev G.P., Gebara P. Magnetostriction and magnetocaloric properties of  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  alloy: Direct and indirect measurements // J. Alloys Comp. 2022. V. 929. P. 167348.
4. Аникин М.С., Тарасов Е.Н., Незнахин Д.С., Сёмкин М.А., Андреев С.В., Селезнёва Н.В., Рагозина М.В., Потапов Е.В., Зинин А.В. Магнитные и магнитокалорические свойства соединений  $\text{TM}_{1-x}\text{Y}_x(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$  // ФММ. 2022. Т. 123. № 4. С. 436–442.
5. Абдулкадирова Н.З., Гамзатов А.Г., Алиев А.М., Gebara P. Теплофизический и магнитокалорические свойства сплава  $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  // ФММ. 2022. Т. 123. № 4. С. 443–447.
6. Hu F.X., Shen B.G., Sun J.R., Sun J., Cheng Z. H. Influence of negative lattice expansion and metamagnetic transition on magnetic entropy change in the compound  $\text{LaFe}_{11.4}\text{Si}_{1.6}$  // Appl. Phys. Letters. 2001. V. 78. P. 3675.
7. Shao Y., Liu J., Zhang M., Yan A., Skokov K.P., Karpenkov D.Yu., Gutfleisch O. High-performance solid-state cooling materials: Balancing magnetocaloric and non-magnetic properties in dual phase La–Fe–Si // Acta Mater. 2017. V. 125. P. 506.
8. Fujita A., Fukamichi K., Yamada M., Goto T. Influence of pressure on itinerant electron metamagnetic transition in compound // Journal of Applied Physics. 2003. V. 93. P. 7263.
9. Fujita A., Fukamichi K., Wang J.-T., Kawazoe Y. Large magnetovolume effects and band structure of itinerant electron metamagnetic  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1.1-x})_{13}$  compounds // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P. 104431.
10. Sun S., Ye R., Long Y. Influence of the substitution of Ni for Fe on the microstructure evolution and magnetic phase transition in  $\text{La}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_{11.5}\text{Si}_{1.5}$  compounds // Mater. Sci. Eng. B. 2013. V. 178. P. 60–64.
11. Krautz M., Skokov K., Gottschall T., Teixeira C.S., Waske A., Liu J., Schultz L., Gutfleisch O. Systematic investigation of Mn substituted  $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$  alloys and their hydrides for room-temperature magnetocaloric application // J. AlloComp. 2014. V. 598. P. 27.
12. Fujita A., Fujieda S., Hasegawa Y., Fukamichi K. Itinerant-electron metamagnetic transition and large magnetocaloric effects in  $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1.1-x})_{13}$  compounds and their hydrides // Phys. Rev. B. 2003. V. 67. P. 104416.
13. Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S.G., Liu J.P. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient // Advanced Mater. 2011. V. 23(7). P. 821–842.
14. Liu Ya., Fu X., Yu Qi., Zhang M., Liu J. Significant reduction of phase-transition hysteresis for magnetocaloric  $(\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x)_2\text{Fe}_{11}\text{Si}_2\text{H}_y$  alloys by microstructural manipulation // Acta Mater. 2021. V. 207. P. 116687.
15. Gębara P., Kovac J. Magnetocaloric effect of the  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  modified by partial substitution of La by Pr or Ho // Mater. & Design. 2017. V. 129. P. 111–115.
16. Gębara P., Cesnek M., Bednarcik J. Anomalous behavior of thermal expansion of  $\alpha$ -Fe impurities in the  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Co}, \text{Si})_{13}$ -based alloys modified by Mn or selected lanthanides (Ce, Pr, Ho) // Current Appl. Phys. 2019. V. 19. P. 188.
17. Gebara P., Margin J. Influence of Partial Substitution of Fe by Mn on the Thermomagnetic Properties of Magnetocaloric  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  Alloy // Acta Phys. Polonica A. 2018. V. 133. P. 648.
18. Pathak A.K., Basnyat P., Dubenko I., Stadler S., Ali N. Magnetic, magnetocaloric and magnetoelastic properties of compounds // J. Appl. Phys. 2009. V. 106. P. 063917.
19. Hu Feng-xia, Shen Bao-gen, Sun Ji-rong, Wang Guang-jun, Cheng Zhao-hua. Very large magnetic entropy change near room temperature in  $\text{LaFe}_{11.2}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  // Appl. Phys. Letters. 2001. V. 80. P. 826.
20. Zavareh M.G., Skourski Y., Skokov K.P., Karpenkov D.Y., Zvyagina L., Waske A., Gutfleisch O. Direct measurement of the magnetocaloric effect in  $\text{La}(\text{Fe},\text{Si},\text{Co})_{13}$  compounds in pulsed magnetic fields // Phys. Rev. Appl. 2017. V. 8(1). P. 014037.
21. Lovell E., Pereira A.M. Dynamics of the First-Order Metamagnetic Transition in Magnetocaloric  $\text{La}(\text{Fe},\text{Si})_{13}$ : Reducing Hysteresis // Adv. Energy Mater. 2014. P. 1401639.

## Magnetization and Magnetostriction of $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) Alloys In Pulsed Magnetic Fields

N. Z. Abdulkadirova<sup>1,\*</sup>, A. G. Gamzatov<sup>1</sup>, A. B. Batdalov<sup>1</sup>, K. I. Kamilov<sup>1,2</sup>, A. M. Aliev<sup>1</sup>, and P. Gebara<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Amirkhanov Institute of Physics, DFRC RAS, Makhachkala, 367003 Russia*

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, 119991 Belarus*

<sup>3</sup> *Institute of Physics, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, 42-200 Poland*

\*e-mail: nnurizhat@mail.ru

**Abstract**—The magnetization and magnetostriction of polycrystalline alloys  $\text{LaFe}_{11.2-x}\text{Mn}_x\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$  ( $x = 0.1, 0.2, 0.3$ ) were measured in pulsed magnetic fields up to 180 kOe in the temperature range 80–270 K. The replacement of Fe atoms by Mn atoms shifts the  $T_C$  towards low temperatures and does not affect the value of saturation magnetization. The observed field dependence of the magnetization  $M(H)$  near the  $T_C$  is characteristic of second-order phase transitions, while the temperature dependence of the magnetization  $M(T)$  above the  $T_C$  in strong magnetic fields indicates a first-order magnetic phase transition. The magnetic volume effect  $\Delta V/V$  reaches 0.81% in a field of 180 kOe. The asymmetry of magnetostriction relative to the temperature of the maximum effect, manifested in strong magnetic fields, and the magnetic field hysteresis of magnetostriction bear signs of a first-order phase transition

*Keywords:* magnetization, magnetostriction, magnetic field