

УДК 621.318:669.15'859'865

## ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА СТРУКТУРУ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ ( $\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x$ ) $_2\text{Fe}_{17}$ ( $x = 0.1, 0.4$ )

© 2021 г. С. В. Веселова<sup>1</sup>\*, И. С. Терешина<sup>1</sup>, В. Н. Вербецкий<sup>1</sup>, К. В. Захаров<sup>1</sup>, А. Н. Васильев<sup>1</sup><sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: sv\_veselova@mail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2020 г.

После доработки 21.12.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Методом индукционной плавки синтезированы твердые растворы ( $\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x$ ) $_2\text{Fe}_{17}$  ( $x = 0.1, 0.4$ ). В результате их гидрирования были получены образцы с высоким содержанием водорода:  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$ . Установлено, что основная фаза типа 2 : 17 в исходных образцах и продуктах их гидрирования кристаллизуется в структурном типе  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ . Внедрение водорода в кристаллическую решетку ( $\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x$ ) $_2\text{Fe}_{17}$  ( $x = 0.1, 0.4$ ) приводит к увеличению не только объема элементарной ячейки, но и температуры Кюри. Вследствие этого намагниченность насыщения в области комнатной температуры у гидридов значительно выше, чем у исходных соединений.

**Ключевые слова:** интерметаллическое соединение, гидриды, кристаллическая структура, намагниченность, температура Кюри

DOI: 10.31857/S0002337X21050109

### ВВЕДЕНИЕ

Благодаря высоким намагниченности насыщения, температуре Кюри и константе магнитокристаллической анизотропии (МКА) интерметаллические соединения редкоземельных и 3d-переходных металлов являются в настоящее время весьма перспективными для разработки на их основе новых магнитотвердых материалов [1]. Характеристики этих соединений обусловлены как действием кристаллического поля на редкоземельные ионы, так и сильными внутри- и междоузельными обменными взаимодействиями.

Соединения на основе железа, модифицированные атомами легких элементов внедрения, с общей формулой  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}(\text{N}, \text{C}, \text{H})_x$  являются актуальными объектами исследования, несмотря на тот факт, что нитриды  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$  ( $x \leq 3$ ) с одноосным типом МКА и магнитными характеристиками выше, чем у  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , были впервые синтезированы еще в 1990 году.  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}(\text{N}, \text{C}, \text{H})_x$  остаются до сегодняшнего дня изученными лишь фрагментарно, хотя комплексное исследование их свойств может дать важную информацию об особенностях взаимодействия электронной и магнитной подсистем, о магнитокристаллических и обменных взаимодействиях между магнитоактивными ионами [2, 3].

В последние годы были проведены исследования структуры и магнитных свойств соединений на основе самария, а именно  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}(\text{N}, \text{C}, \text{H})_x$ , на

предмет выяснения влияния различных замещений как в подрешетке РЗМ, так и в подрешетке Fe [4–7]. Установлено, что использование таких многокомпонентных систем открывает возможность создания новых магнитных материалов с необходимым комплексом магнитных свойств в заданной области температур и полей, что крайне важно для их применения в различных отраслях науки и техники [8].

Атомы внедрения (водород, азот и углерод) значительно повышают температуру Кюри соединений  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$ , а также могут оказывать влияние на намагниченность насыщения и константы МКА [9, 10]. Смена знака константы  $K_1$  с отрицательного на положительный, которая наблюдается в нитридах  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_x$  и карбидах  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{C}_x$ , имеет место в ряде гидридов  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$  ( $\text{R} = \text{Pr}$  и  $\text{Tb}$ ) [11]. Известно, что  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  способны максимально поглощать до 5 атомов водорода на формульную единицу (ат. Н/форм. ед.) в случае как тяжелых, так и легких РЗМ (тип кристаллической решетки – гексагональный ( $\text{Th}_2\text{Ni}_{17}$ ) и ромбоэдрический ( $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ ) соответственно). Внедрение максимального количества водорода в кристаллическую решетку таких соединений приводит к увеличению объема элементарной ячейки. Гидрирование соединений  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  способствует значительному изменению их магнитных свойств по причине трансформации кристаллической, электронной и магнитной структур, что связано с объ-

емными эффектами (увеличением/уменьшением расстояний в парах Fe–Fe, R–Fe), усилением магнетизма подрешетки железа, а также с химическим эффектом при введении атомов внедрения [12].

Взаимодействие  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  с водородом изучено довольно обстоятельно [13], в то время как полностью отсутствует информация о взаимодействии водорода с твердыми растворами  $(\text{Sm}, \text{Er})_2\text{Fe}_{17}$ .

Целью данной работы является исследование взаимодействия  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $x = 0.1$  и  $0.4$ ) с водородом, а также изучение структуры и магнитных свойств исходных соединений и их гидридов  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$ . Кроме того, проведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными данными для изученных ранее гидридов  $(\text{Sm}, \text{R})_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Сплавы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}$  с  $x = 0.1$  и  $0.4$  (1.1 и 4.2 ат. %) готовили методом индукционной плавки из металлов высокой чистоты (Sm, Er – 99.5%, Fe – 99.9%) в атмосфере аргона. Полученные образцы подвергались гомогенизирующему отжигу в вакуумированных кварцевых ампулах при температуре 1273 К в течение 8 суток. Контроль химического состава и однородности образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO EVO 50 XVP.

Гидриды синтезировали на специальной установке прямой реакцией исходных сплавов (навески массой до 20 г) с водородом под давлением до 35 МПа. Для гидрирования использовался водород высокой чистоты (содержание примесей  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  мас. %). Поскольку реакция гидрирования при комнатной температуре не наблюдалась, образец в автоклаве нагревали до 200°C аналогично [14]. При расчете количества поглощенного водорода использовали уравнение Ван-дер-Ваальса. Установлено образование стабильных гидридов следующих составов:  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$ . Относительная ошибка определения содержания водорода –  $\pm 0.1$  H/ $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $\pm 0.05$  мас. %  $\text{H}_2$ ). Чистоту фазового состава исходных и прогидрированных образцов исследовали методом стандартной рентгеновской дифракции на дифрактометре ДРОН-4-07 с использованием  $\text{CoK}_\alpha$ -излучения ( $\lambda = 1.07921$  Å) при комнатной температуре. Параметры элементарной ячейки определены методом полнопрофильного анализа Ритвельда с использованием программы RIETAN-2000. Ошибка в определении параметров составила  $\pm(0.01-0.05)\%$ .

Температурные и полевые зависимости намагниченности изучали с помощью установки измерения физических свойств материалов PPMS-9

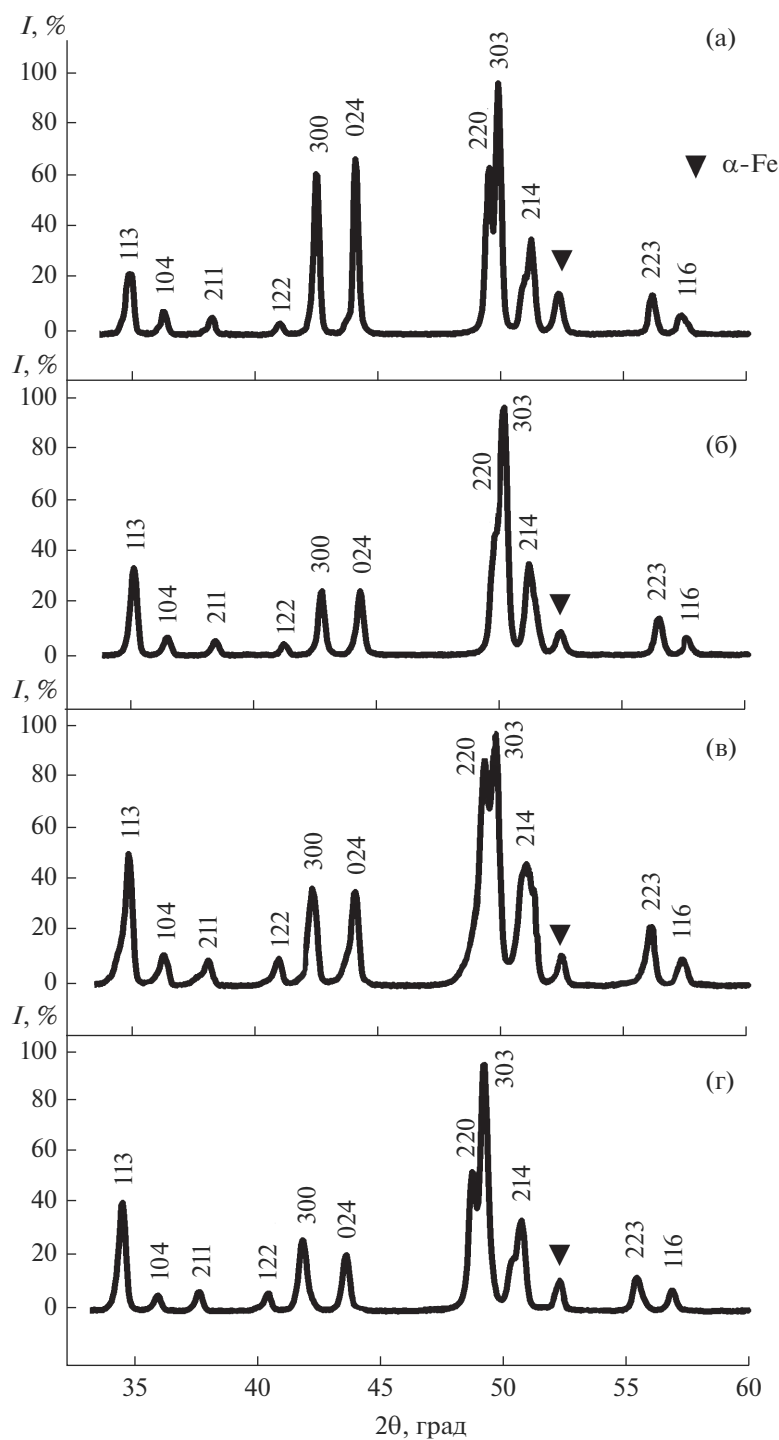
(Quantum Design) на кафедре низких температур и сверхпроводимости физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый и микроструктурный анализы литых сплавов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  показали, что в дополнение к основной фазе типа 2 : 17 присутствовали  $\alpha$ -Fe и самарий-обогащенная фаза типа 1 : 3. По данным РФА и СЭМ, в результате проведения высокотемпературной гомогенизации в сплавах наряду с основной фазой 2 : 17, кристаллизующейся в структурном типе  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ , осталась магнитомягкая фаза  $\alpha$ -Fe (рис. 1а и 1б). Причем доля нерастворившегося  $\alpha$ -Fe в образце  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  не превышает 8 мас. %, а в образце  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  – не более 5 мас. %. Значения периодов решетки основной фазы типа 2 : 17 в образцах до и после гидрирования представлены в табл. 1 в сопоставлении с данными для  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$  [14, 15]. Рентгенографическое исследование гидридных фаз с высоким содержанием водорода показало, что продукты гидрирования  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  сохраняют структуру исходного материала (стр. тип  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ ), при этом объем элементарной ячейки увеличивается на 3.5%. Установлено, что абсорбция водорода сопровождается анизотропным расширением ячейки, происходящим преимущественно в базовой плоскости.

На рис. 1в и 1г представлены дифрактограммы образцов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  после гидрирования, которые отличаются от дифрактограмм гомогенизированных сплавов: заметно уширены линии основной фазы и смещены в сторону малых углов по причине расширения решетки, вызванного внедренными атомами водорода. Это может свидетельствовать о качественных и количественных изменениях фазового состава. В частности, выявлено небольшое изменение объемных долей фаз 2 : 17 и  $\alpha$ -Fe. Однако явные признаки протекания реакции гидрогенолиза полученных гидридов на  $\alpha$ -Fe и  $(\text{Sm}, \text{Er})_y\text{H}$  ( $y = 2, 3$ ) отсутствуют. Содержание фазы  $\alpha$ -Fe практически не изменилось после абсорбции водорода образцом  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$ . В образце  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  количество примесной фазы  $\alpha$ -Fe уменьшилось до 4 мас. %, что, возможно, связано с взаимодействием невыявленной после отжига фазы  $(\text{Sm}, \text{Er})\text{Fe}_3$ , которая могла остаться в слитке в виде следов после гомогенизации, с железом.

Внедрение атомов водорода в кристаллическую решетку соединений  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$ ,  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  оказало влияние на магнитные свойства. На рис. 2 показаны результаты терромагнитного анализа для исходных соединений. Видно, что в зависимости от содержания Er температура Кюри понижается



**Рис. 1.** Дифрактограммы порошков сплавов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  (а),  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  (б) после гомогенизации при 1273 К в течение 8 дней и их гидридов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  (в),  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$  (г).

от значения 390 К для  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  до 360 К для  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$ . Возрастание температуры Кюри в результате гидрирования составляло в среднем 30 К/ат. Н, что хорошо согласуется с данными [10].

На рис. 3 представлены петли магнитного гистерезиса исходных образцов и их гидридов

$\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$ ,  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$ , измеренные при комнатной температуре в полях напряженностью до 7 МА/м. Видно, что коэрцитивность по намагниченности ( $jH_c$ ) как для исходных, так и для гидрированных образцов крайне мала. Полученные результаты находятся в соответствии с

**Таблица 1.** Рентгенографические данные образцов  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $x = 0.1, 0.4$ ) и продуктов их гидрирования (стр. тип  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ )

$x$	Образец	Содержание фазы 2 : 17 в образце, %	$a, \text{Å}$	$c, \text{Å}$	$c/a$	$V, \text{Å}^3$	$\Delta V/V, \%$
0	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ [15]	Не указано	8.553	12.442	1.455	—	—
	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_2$ [15]	Не указано	8.653	12.506	1.445	—	2.9
0	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ [14]	Не указано	8.554	12.443	1.455	788.4	—
	$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.7}$ [14]	Не указано	8.682	12.550	1.446	819.2	3.9
0.1	$\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$	92	8.555(8)	12.453(9)	1.456	788.8	—
	$\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$	96	8.632(1)	12.511(7)	1.449	815.6	3.3
0.4	$\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$	95	8.518(2)	12.431(4)	1.459	791.3	—
	$\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$	96	8.641(7)	12.520(1)	1.449	818.6	3.5

Примечание. Структурный тип и параметры решетки приведены для основной фазы  $(\text{Sm,Er})_2\text{Fe}_{17}$ .

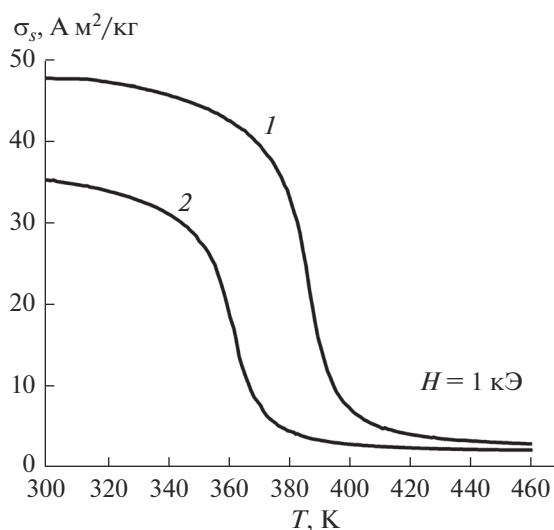
данными по магнитным свойствам гидридов  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$  ( $2 \leq x \leq 5.2$ ) [13]. Низкие значения коэрцитивной силы гидридов обусловлены прежде всего магнитной анизотропией типа “легкая плоскость”, при которой магнитные моменты атомов РЗМ и Fe ориентированы в базисной плоскости и достаточно легко вращаются под действием внешнего магнитного поля. Из рис. 3 также видно, что приложение внешнего магнитного поля способствует полному магнитному насыщению образцов.

В табл. 2 приведены полученные значения основных магнитных характеристик, а также данные [6, 15, 16] для  $(\text{Sm,R})_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$ . Намагниченность насыщения ( $\sigma_s$ ) образцов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  значительно возрастает после гидрирования. На-

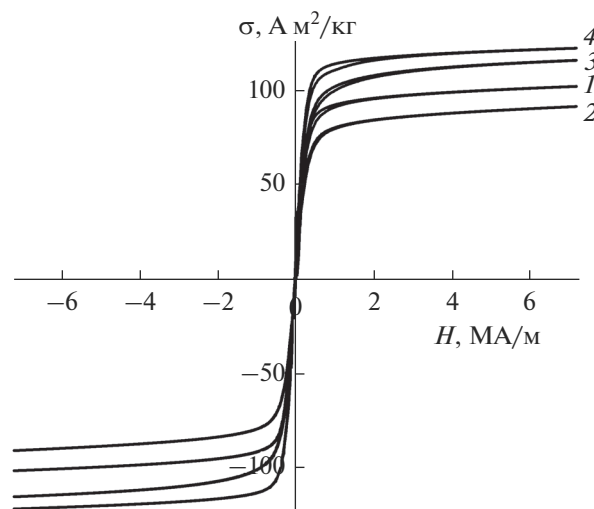
магниченность насыщения образцов, приведенных в табл. 2, была пересчитана на мас. % фазы 2 : 17 по формуле

$$\sigma_s(2 : 17) = [\sigma_s(\text{образца}) - \sigma_s(\alpha - \text{Fe})\omega(\alpha - \text{Fe})] / \omega(2 : 17) \times 100, \quad (1)$$

где  $\sigma_s(\alpha - \text{Fe}) = 210 \text{ А м}^2/\text{кг}$ ,  $\omega$  – содержание фазы в образце (мас. %). После пересчета значения  $\sigma_s$  составляют 85 и 82  $\text{А м}^2/\text{кг}$  для  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$ , а для  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$  – 110 и 113  $\text{А м}^2/\text{кг}$  соответственно. Намагниченность насыщения у гидрида  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_{5.2}$  в области комнатной температуры намного выше, чем у  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ , что связано с увели-



**Рис. 2.** Терромагнитный анализ сплавов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  (1) и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  (2).



**Рис. 3.** Петли магнитного гистерезиса исходных образцов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  (1),  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  (2) и гидридов  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  (3),  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$  (4), измеренные при комнатной температуре в полях до 7 МА/м.

**Таблица 2.** Магнитные характеристики твердых растворов  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $x = 0.1, 0.4$ ) и гидридов на их основе  $(\text{Sm}_{1-x}\text{Er}_x)_2\text{Fe}_{17}\text{H}_y$  ( $y = 4.4, 4.6$ )

Состав	$\sigma_s$ , А м <sup>2</sup> /кг	$T_C$ , К	Источник
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$	109	386	[16]
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$	118	398	[15]
$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_{5.2}$	149.6	554	[15]
$\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$	100 (85)	390	Данная работа
$\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$	116 (110)	525	Данная работа
$\text{Sm}_{1.6}\text{Er}_{0.4}\text{Fe}_{17}$	79	400	[6]
$\text{Sm}_{1.2}\text{Y}_{0.8}\text{Fe}_{17}$	108	375	[16]
$\text{Sm}_{1.2}\text{Tb}_{0.8}\text{Fe}_{17}$	90.3	390	[16]
$\text{Sm}_{1.2}\text{Dy}_{0.8}\text{Fe}_{17}$	77	429	[6]
$\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$	77	391	[6]
$\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$	90 (82)	360	Данная работа
$\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$	120 (113)	490	Данная работа

\* В скобках даны уточненные по формуле (1) значения намагниченности насыщения  $\sigma_s$  (2 : 17).

чением температуры Кюри. Частичная замена атомов самария ( $\mu_{\text{Sm}} = 0.7 \mu_B$ ) на атомы тяжелого РЗМ эрбия ( $\mu_{\text{Er}} = 9 \mu_B$ ) приводит к снижению намагниченности насыщения, т. к. атомы эрбия упорядочиваются антипараллельно атомам Fe и Sm. Другими словами, исследованные магнетики являются трехподрешеточными, а магнитная структура в них меняется с ферро- на ферримангнитную. Все три подрешетки (самария, эрбия и железа) дают свои аддитивные вклады в магнитные свойства. Магнитокристаллическая анизотропия соединений  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  (как с магнитными (R = Sm, Er), так и с немагнитными РЗМ (Y, Lu)), а также  $(\text{Sm,Er})_2\text{Fe}_{17}$  является легкоплоскостной. Гидрирование не изменяет тип МКА, поэтому высококоэрцитивное состояние в материалах на основе гидридов не реализуется.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное исследование структурных и магнитных свойств соединений  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.2}\text{Fe}_{17}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$  и их гидридов с высоким содержанием водорода —  $\text{Sm}_{1.8}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.4}$  и  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$ . Установлено, что, хотя тип кристаллической структуры не изменяется, происходит анизотропное изменение параметров решетки с увеличением объема элементарной ячейки до 3.5%, в результате чего изменялись магнитные свойства. Наибольший эффект влияния водорода на намагниченность при  $T = 300$  К был обнаружен для  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}\text{H}_{4.6}$ :  $\sigma_s = 113$  А м<sup>2</sup>/кг (для сравнения для  $\text{Sm}_{1.2}\text{Er}_{0.8}\text{Fe}_{17}$   $\sigma_s = 83$  А м<sup>2</sup>/кг). Варьируя содержание водорода и соотношение Sm/Er, можно изменять  $\sigma_s$ .

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00135).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skomski R. Permanent Magnets: History, Current Research, and Outlook // Novel Functional Magnetic Materials / Ed. Zhukov A. Cham: Springer, 2016. P. 359–395. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26106-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26106-5_9)
2. Fujii H., Sun H. Interstitially-Modified Intermetallics or Rare-Earth and 3d Elements // Handbook of Magnetic Materials / Ed. Buschow K.H.J. Amsterdam: North Holland, 1995. V. 9. P. 303–404. [https://doi.org/10.1016/s1567-2719\(05\)80007-1](https://doi.org/10.1016/s1567-2719(05)80007-1)
3. Tereshina I.S., Nikitin S.A., Skokov K.P., Palewski T., Zubenko V.V., Telegina I.V., Verbetsky V.N., Salamova A.A. Magnetocrystalline Anisotropy of  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_3$  ( $x = 0, 3$ ) Single Crystals // J. Alloys Compd. 2003. V. 350. P. 264–270. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(02\)00957-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(02)00957-X)
4. Lu Yi., Tegus O., Li Q.A., Tang N., Yu M.J., Zhao R.W., Kuang J.P., Yang F.M., Zhou G.F., Li X., de Boer F.R. Magnetic Anisotropy of  $(\text{Sm, Y})_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y$  Compounds // J. Phys.: Condens. Matter. 1992. V. 177. P. 243–246. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(92\)90104-Z](https://doi.org/10.1016/0921-4526(92)90104-Z)
5. Zeng Yi, Lu Z., Tang N., Li X., Zhao R.W., Yang F.M. Structural, Magnetic and Microscopic Physical Properties of  $(\text{Sm, Pr})_2\text{Fe}_{17}$  and Their Nitrides // J. Magn. Mater. 1995. V. 139. P. 11–18. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(95\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0304-8853(95)90023-3)
6. Tegus O., Lu Yi., Tang N., Wu J., Mingjun Yu., Li Q.A., Zhao R.W., Jian Y., Fuming Y. Magnetic Properties of  $(\text{Sm}_{1-x}\text{R}_x)_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y$  (R = Dy, Er) Compounds // IEEE

- Trans Magn. 1992. V. 58. P. 2581–2583.  
<https://doi.org/10.1109/20.179563>
7. Kubis M., Gutfleisch O., Gesel B., Müller K.-H., Harris I.R., Schultz L. Influence of M = Al, Ga and Si on Microstructure and HDDR-Processing of  $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{M})_{17}$  and Magnetic Properties of Their Nitrides and Carbides // J. Alloys Compd. 1999. V. 283. P. 296–303.  
[https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(98\)00861-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(98)00861-5)
  8. Hirose S., Nishino M., Miyashita S. Perspectives for High-performance Permanent Magnets: Applications, Coercivity, and New Materials // Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol. 2017. V. 8. P. 013002.  
<https://doi.org/10.1088/2043-6254/aa597c>
  9. Tereshina E.A., Yoshida H., Andreev A.V., Tereshina I.S., Koyama K., Kanomata T. Magnetism of a  $\text{Lu}_2\text{Fe}_{17}\text{H}$  Single Crystal under Pressure // J. Phys. Soc. Jpn. 2007. V. 76. P. 82–83.  
<https://doi.org/10.1143/JPSJS.76SA.82>
  10. Isnard O., Miraglia S., Fruchart D. Interstitial Insertion in  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$ , Volume Effects and Their Correlation with the Magnetic Properties // J. Magn. Magn. Mater. 1995. V. 140–144. P. 981–982.  
[https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)01458-2](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)01458-2)
  11. Tereshina E.A., Drulis H., Skourski Y., Tereshina I. Strong Room-Temperature Easy-Axis Anisotropy in  $\text{Tb}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_3$ : An Exception among  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  Hydrides // Phys. Rev. B. 2013. V. 87. P. 214425(5).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.214425>
  12. Nikitin S., Tereshina I., Tereshina E., Suski W., Drulis H. The Effect of Hydrogen on the Magnetocrystalline Anisotropy of  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$  and  $\text{R}(\text{Fe}, \text{Ti})_{12}$  (R = Dy, Lu) Compounds // J. Alloys Compd. 2008. V. 451. P. 477–480.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.04.106>
  13. Менушенков В.П., Вербецкий В.Н., Лилеев А.С., Саламова А.А., Боброва А.А., Аюян А.Г. Взаимодействие соединения  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  с водородом и азотом. Магнитные свойства образующихся гидридов и нитридов // Металлы. 1996. № 1. С. 95–100.
  14. Isnard O., Miraglia S., Soubeyroux J.L., Fruchart D., l'Héritier P. A Structural Analysis and Some Magnetic Properties of the  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$  Series // J. Magn. Magn. Mater. 1994. V. 137. P. 151–156.  
[https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90201-1](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90201-1)
  15. Rengen X., Xinhua W., Jianmin W., Hongge P., Changpin C., Qidong W., Lichi D. Effects of Al Content on Structural Stability and Magnetic Properties of  $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{Al})_{17}$  Compounds // J. Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 1999. V. 9. № 1. P. 40–43.
  16. Huang M.Q., Zheng Y., Miller K., Elbicki J.M., Sankar S.G., Wallace W.E. Magnetism of  $(\text{Sm}, \text{R})_2\text{Fe}_{17}\text{N}_y$  (R = Y, Tb or Mischmetal) // J. Appl. Phys. 1991. V. 7. P. 6024–6026.  
<https://doi.org/10.1063/1.350081>