

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.638.5

МАГНИТНЫЕ И МАГНИТОТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА СОЕДИНЕНИЙ $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$

© 2022 г. М. С. Аникин^{a, *}, Е. Н. Тарасов^a, Д. С. Незнахин^a, М. А. Сёмкин^{a, b}, С. В. Андреев^a,
Н. В. Селезнёва^a, М. В. Рагозина^{a, b}, Е. В. Потапов^a, А. В. Зинин^a

^aИнститут естественных наук и математики, Уральский федеральный университет,
ул. Куйбышева, 48, Екатеринбург, 620026 Россия

^bИнститут физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

*e-mail: maksim.anikin@urfu.ru

Поступила в редакцию 28.10.2021 г.

После доработки 22.12.2021 г.

Принята к публикации 23.12.2021 г.

Изучено влияние замещения туллия иттрием в соединении $Tm(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ на кристаллическую структуру, температурные и полевые зависимости намагниченности (σ), температурные зависимости высокополевой восприимчивости (χ_{hf}), изотермического изменения магнитной части энтропии (ΔS_m) и адиабатического изменения температуры (ΔT_{ad}). Измерения магнитных и магнитотепловых свойств проводили в магнитных полях напряженностью до 90 кЭ и диапазоне температур 5–380 К. На зависимостях $\sigma(T)$ во внешнем магнитном поле 100 Э обнаружена инверсия намагниченности. При температуре 5 К на полевой зависимости магнитного момента соединения $Tm_{0.4}Y_{0.6}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ обнаружен перегиб в магнитном поле 49.5 кЭ, при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля увеличивается восприимчивость образца к магнитному полю. В образцах, обладающих температурами магнитной компенсации, происходит чередование прямого и обратного магнитокалорического эффекта (МКЭ). В ряде исследованных соединений наблюдается плато-подобная температурная зависимость ΔS_m и ΔT_{ad} в области температур обратного МКЭ. Полученные результаты обсуждаются.

Ключевые слова: магнитные свойства, прямой и обратный магнитокалорический эффект, адиабатическое изменение температуры, магнитный момент, фазы Лавеса, температура Кюри, точка компенсации

DOI: 10.31857/S0015323022040039

ВВЕДЕНИЕ

При воздействии магнитного поля на образцы бинарных соединений типа RCo_2 (где R – тяжелый редкоземельный металл) происходит изменение магнитного состояния вещества вследствие изменения внутренней магнитной энергии, что вызывает обратимое выделение или поглощение тепла [1], т.е. в веществе реализуется физическое явление, именуемое как магнитокалорический эффект (МКЭ). Данный эффект в этих соединениях интенсивно изучается свыше трех десятилетий. При исследовании магнитных свойств и МКЭ квазибинарных систем $R(Co, Fe)_2$, было обнаружено, что частичное замещение Co на Fe приводит как к росту температуры Кюри (T_C), так и к появлению значительных величин МКЭ в широком температурном диапазоне ниже T_C [2, 3]. Авторы связали значительный по величине магнитокалорический эффект в широком диапазоне температур с ослаблением межподрешеточного обменного

взаимодействия между R - и $3d$ -магнитными подрешетками.

Более наглядно данный эффект можно описать при рассмотрении температурных зависимостей параметров МКЭ, таких как изменение магнитной части энтропии (ΔS_m) и адиабатическое изменение температуры (ΔT_{ad}). При увеличении содержания Fe виды зависимостей $\Delta S_m(T)$ и $\Delta T_{ad}(T)$ трансформируются из зависимостей с явно выраженным максимумом при T_C в плато-подобные зависимости. Плато-подобная зависимость является суперпозицией максимума при T_C и “низкотемпературного” максимума. Последний возникает из-за упорядочения внешним магнитным полем магнитных моментов R -ионов, частично разупорядоченных тепловыми флуктуациями вследствие слабого обменного взаимодействия между подрешетками R - и $3d$ -ионов.

При фиксированном процентном соотношении Co и Fe, когда меняется только элемент R ,

наблюдается снижение T_C от Gd к Er [4]. Это объясняется тем, что с увеличением атомного номера R -ионов происходит уменьшение радиуса $4f$ -оболочки, что ведет к меньшему перекрытию $4f$ - и $5d$ -оболочек, и соответствующему ослаблению $4f$ – $3d$ -обменного взаимодействия [5]. В свою очередь, форма зависимости $\Delta S_m(T)$ также изменяется от пика к плато-подобной зависимости [6]. Таким образом, варьируя энергию междоузельного обменного взаимодействия, по средствам изменения элемента R и/или концентрации Fe можно существенно изменять как значения T_C , так и ширину пика МКЭ. Это является потенциальным инструментом для более глубокого исследования роли междоузельных обменных взаимодействий в формировании магнитных и магнитотепловых свойств соединения со структурой фаз Лавеса.

В бинарных соединениях RCo_2 отсутствует плато-подобная зависимость МКЭ, и замещение одной магнитоактивной редкой земли на другую $(R,R')Co_2$ не приводит к значительным изменениям магнитотепловых свойств [7, 8]. В данной работе для изучения роли междоузельного обменного взаимодействия R - и $3d$ -ионов в формировании магнитных и магнитокалорических свойств были исследованы соединения $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$. При замене магнитоактивных ионов туллия на немагнитные ионы иттрия должно происходить постепенное изменение магнитных и магнитотепловых свойств соединений вследствие уменьшения энергии $4f$ – $3d$ -обменного взаимодействия.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы поликристаллических соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ ($x = 0-1$) были выплавлены в электродуговой печи в защитной атмосфере гелия. Для предотвращения формирования фаз, богатых $3d$ -элементом, в шихту добавляли избыток туллия в количестве 5 вес. % и избыток иттрия в количестве 9 вес. % для образцов с $x = 0.4$ и 0.6 , для остальных x избыток туллия и иттрия – 5 вес. %. Гомогенизация сплавов была произведена в вакуумной печи при температуре 1073 К (800°C) в течение суток. Фазовый анализ и уточнение параметров кристаллической структуры выполнено методом рентгеновской дифракции, с применением порошкового дифрактометра D8 Advance (Bruker) с источником излучения $CuK\alpha$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Обработка рентгенограмм проведена с помощью полнопрофильного метода Ритвельда с применением программного обеспечения Full-ProfSuite [9].

Магнитные свойства образцов исследованы на установке PPMS DynaCool (Quantum Design) в интервале температур 5–370 К в магнитном поле до 90 кЭ. Прямое измерение адиабатического из-

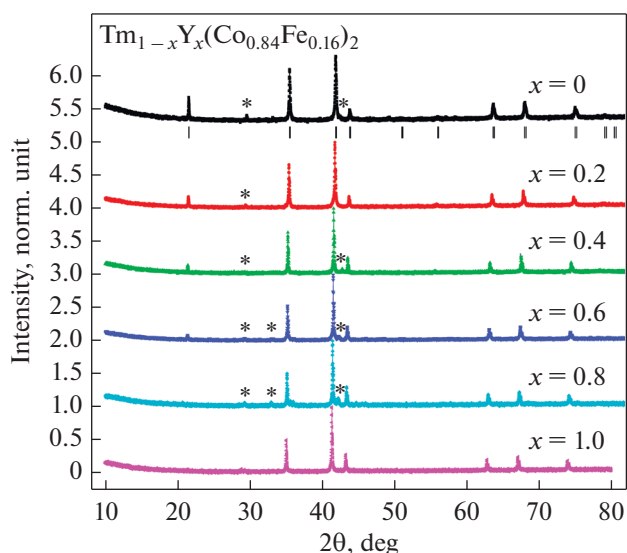


Рис. 1. Приведенные экспериментальные рентгенограммы порошковых образцов соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$. Под рентгенограммой образца с $x = 0$, указаны положения Брэгговских рефлексов основной фазы 1 : 2. Пики от примесных фаз отмечены звездочками.

менения температуры выполнено на экспериментальной установке MagEq MMS SV3 в температурном диапазоне 80–370 К при изменении напряженности приложенного магнитного поля (ΔH) на 17.5 кЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Рентгеноструктурный анализ порошковых образцов сплавов $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ при комнатной температуре показал (рис. 1), что содержание основной фазы Лавеса стехиометрического состава 1 : 2 не менее 98% и образцы можно считать достаточно однофазными. Основную долю примесных фаз составили оксиды Tm_2O_3 . Уточненные значения параметра кристаллической решетки a представлены на рис. 3.

На рис. 2 представлены температурные зависимости удельной намагниченности (σ) соединения $Tm_{0.6}Y_{0.4}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$, измеренные при нагреве образца в магнитном поле 100 Э, с предварительным охлаждением без магнитного поля (протокол ZFC) и измеренные при охлаждении образца в магнитном поле 100 Э (протокол FC). Представленные зависимости $\sigma(T)$ свидетельствуют об отсутствии примесных магнитных фаз в данном соединении. Аналогичным образом проверена магнитная однофазность всех исследованных соединений. На основе зависимостей $\sigma(T)$ при $H = 100 \text{ Э}$ по экстремуму первой производной $d\sigma/dT$ определены

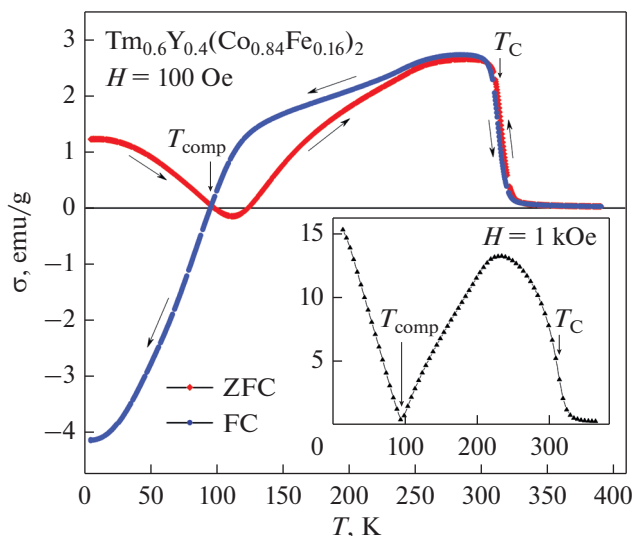


Рис. 2. Температурные зависимости удельной намагниченности $\text{Tm}_{0.6}\text{Y}_{0.4}(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$ во внешнем магнитном поле 100 Ое измеренные по протоколам ZFC и FC. На вставке зависимость $\sigma(T)$ соединения с $x = 0.4$ при $H = 1$ кЭ.

температуры Кюри всех исследуемых образцов, полученные значения T_C представлены на рис. 3.

Из анализа зависимостей $\sigma(T)$ всех соединений установлено, что при $x \leq 0.6$ наблюдается пересечение зависимостей $\sigma(T)$, измеренных по протоколам ZFC и FC в нуле при температурах ниже T_C . Это соответствует равенству величин антипараллельно направленных магнитных моментов R - и $3d$ -подрешеток ($\sigma = 0$), а соответствующая температура, при которой это происходит, называется температурой магнитной компенсации ($T_{\text{комп}}$). Более наглядно компенсация магнитных моментов видна из представленной на вставке рис. 2 зависимости $\sigma(T)$ во внешнем магнитном поле 1 кЭ. На рис. 3 представлены полученные значения $T_{\text{комп}}$ для всех исследованных соединений. При содержании иттрия $x = 0.8$ намагниченность $3d$ -подрешетки больше, чем намагниченность R -подрешетки во всем температурном диапазоне. При полной замене магнитных ионов тулия на магнитные ионы иттрия ($x = 1$) соединение $\text{Y}(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$ является ферромагнетиком, в то время как все остальные образцы – ферримагнетики.

Наличие отрицательных значений намагниченности на зависимостях $\sigma(T)$ (при $H = 100$ Э) является следствием того, что напряженность внешнего магнитного поля меньше коэрцитивной силы образца и происходит инверсия магнитного момента. Рассмотрим подробнее кривую FC, представленную на рис. 2, в магнитоупорядоченной области температур. Выше $T_{\text{комп}}$ намагни-

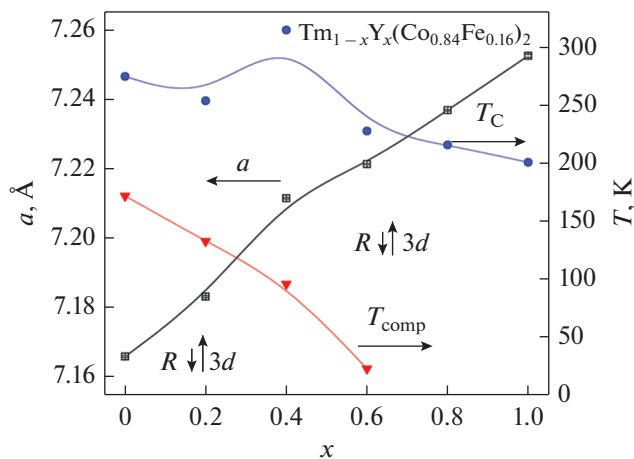


Рис. 3. Концентрационные зависимости параметра кристаллической решетки (слева) и температур T_C и $T_{\text{комп}}$ (справа) в соединениях $\text{Tm}_{1-x}\text{Y}_x(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$.

ченность $3d$ -подрешетки (σ_{3d}) превосходит намагниченность редкоземельной подрешетки (σ_R) и результирующая намагниченность σ сонаправлена с σ_{3d} и H . При понижении температуры ниже $T_{\text{комп}}$, σ_R становится больше σ_{3d} , но из-за того, что энергии внешнего магнитного поля недостаточно для разворота векторов намагничивания, наблюдается отрицательная намагниченность. В случае ZFC кривой ситуация аналогична, но при повышении температуры возрастает энергия тепловых флуктуации и снижается коэрцитивная сила, что способствует перевороту векторов намагничивания к направлению H . Похожий эффект наблюдали ранее на редкоземельных интерметаллидах RFe_5Al_7 [10, 11].

Из рис. 3 следует, что параметр кристаллической решетки при увеличении содержания иттрия непрерывно возрастает. На концентрационной зависимости температуры Кюри наблюдается локальный минимум при $x = 0.6$. Это может быть связано с неоднородным распределением атомов тулия и иттрия по позициям $8b$, приводящим к осцилляции межподрешеточного обменного взаимодействия, вносящего существенный вклад в обменную энергию всей системы. Аналогичный результат наблюдали ранее на родственных соединениях [12, 13].

На рис. 4 представлена кривая намагничивания и размагничивания образца $\text{Tm}_{0.4}\text{Y}_{0.6}(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$, измеренная при температуре 5 К. На кривой намагничивания в магнитном поле $H \approx 49.5$ кЭ наблюдается перегиб с более быстрым увеличением намагниченности при дальнейшем увеличении магнитного поля. Данное соединение является ферримагнетиком, в котором при низкой температуре магнитный момент R -подрешетки превосходит магнитный момент $3d$ -подрешетки, и мо-

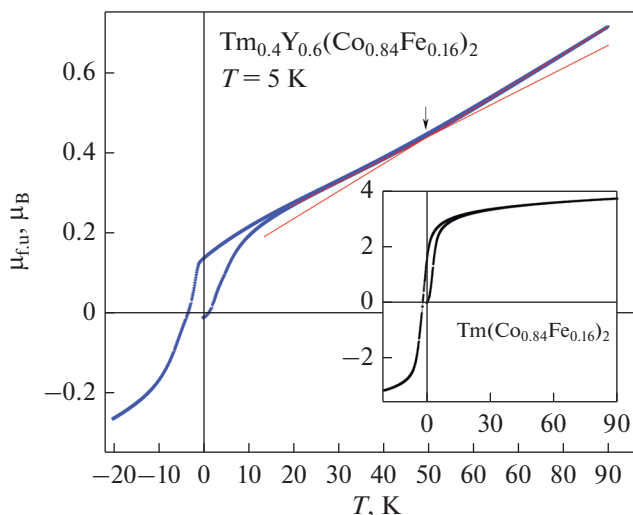


Рис. 4. Кривая намагничивания и размагничивания $Tm_{0.4}Y_{0.6}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ в магнетонах Бора на формульную единицу ($\mu_{f,u}$), при 5 К. Красные линии являются линейными экстраполяциями прямых участков до и после точки излома (для наглядности). На вставке кривая намагничивания и размагничивания $Tm(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$, при 5 К.

лекулярное магнитное поле (H_m), действующее со стороны R -подрешетки на $3d$ -подрешетку, противоположно внешнему магнитному полю H . Эффективное поле $H_{эф}$, действующее на $3d$ -подрешетку со стороны R -подрешетки, равно $H_{эф} = H_m - H$. При достаточной напряженности внешнего магнитного поля $H_{эф} = 0$. Следовательно, данный перегиб может соответствовать полю старта (H_s) коллапса магнитного момента Co , т.е. его переходу из ферромагнитного в парамагнитное состояние. Ранее данное явление наблюдали на родственных соединениях $Tm-Lu(Co_{0.88}Al_{0.12})_2$ [14], $Tm-Y(Co_{0.88}Al_{0.12})_2$ [15], $Er-YCo_2$ и $Er-TmCo_2$ [16], где минимальное значение $H_s = 30$ кЭ. С другой стороны, в отличие от представленных в литературе родственных соединений в исследованном соединении $Tm_{0.4}Y_{0.6}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ $3d$ -подрешетка содержит Fe , и даже при $H_{эф} = 0$ кобальт за счет $3d$ -обмена остается магнитоупорядоченным, как в случае с $Y(Co_{1-y}Fe_y)_2$ [17], при $y \geq 0.15$. Поэтому другой возможной причиной наличия перегиба может быть изменение основного состояния иона Tm , вызванное соответствующим увеличением эффективного поля, действующего на атомы Tm [14].

Для остальных соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ кривые намагничивания и размагничивания близки между собой и аналогичны представленной на вставке рис. 4 зависимости $\mu_{f,u}(H)$ для соединения $Tm(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$. При температуре 5 К значения коэрцитивной силы (H_c) равны 1.67, 1.71, 1.75, 3.21, 0.39, ≈ 0 кЭ и магнитный момент

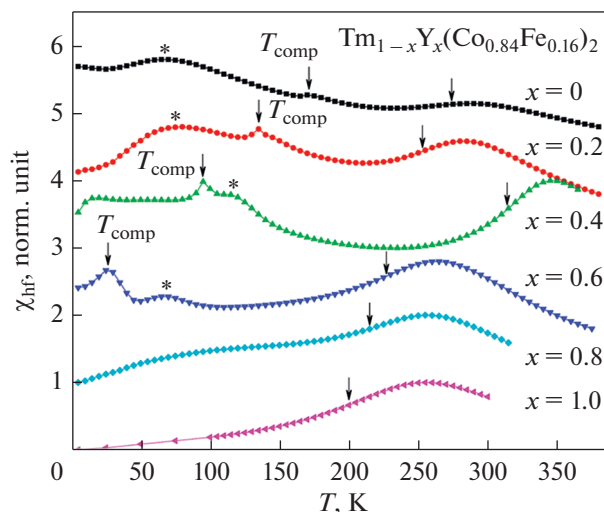


Рис. 5. Зависимости $\chi_{hf}(T)$ для соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$. Стрелками без подписей указаны температуры Кюри. Звездочки указывают дополнительные пики.

при 90 кЭ равен 3.7, 2.7, 1.4, 0.7, 1.3, 1.9 μ_B соответственно для $x = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$.

На рис. 5 представлены температурные зависимости высокополевого восприимчивости $\chi_{hf}(T)$ исследованных образцов, определенные по формуле $\chi_{hf} = d\sigma/dH$ из кривых намагничивания, в диапазоне магнитных полей 20–70 кЭ. На зависимостях $\chi_{hf}(T)$ температурам Кюри и точкам магнитной компенсации соответствуют локальные максимумы, которые на рис. 5 отмечены стрелками. Помимо них на зависимостях $\chi_{hf}(T)$ присутствуют дополнительные максимумы, которые отражают наличие в исследованных соединениях фазовым переходам типа “порядок–порядок”, которым должны соответствовать дополнительные экстремумы на зависимостях $\Delta S_m(T)$.

Изменение магнитной части энтропии было рассчитано из серии изотерм намагниченности по формуле (1) [18]:

$$\Delta S_m(\Delta H, T) = \int_0^{H_f} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right)_H dH, \quad (1)$$

где H_f – максимальное значение магнитного поля, $\Delta H = H_f - 0$ и T – абсолютная температура. На рис. 6 представлены полученные температурные зависимости ΔS_m , приведенные к значению ΔS_m в T_C от приведенной к T_C температуры ($\Delta S_m / \Delta S_{T_C}(T/T_C)$) при $\Delta H = 20$ кЭ. Из представленной зависимости наглядно видно, что значения ΔS_m при T_C могут быть меньше значений ΔS_m в окрестностях “низкотемпературного” максимума в 9.5 раза при $\Delta H = 20$ кЭ и в 12 раз при $\Delta H = 70$ кЭ. В родственных соединениях $R(Co_{0.88}Fe_{0.12})_2$

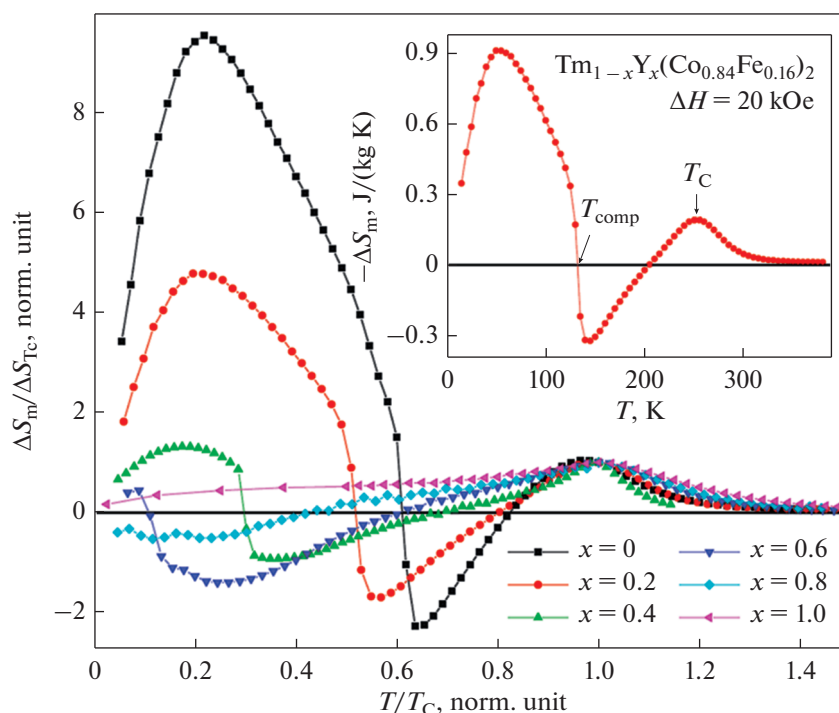


Рис. 6. Зависимости $\Delta S_m/\Delta S_{T_c}(T/T_c)$ соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ в поле 20 кЭ. На вставке представлена зависимость $\Delta S_m(T)$ для соединения $Tm_{0.8}Y_{0.2}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$.

максимальное превышение низкотемпературного максимума ΔS_m над максимумом в T_c только в 1.3 раза в магнитном поле 10 кЭ в соединении с Eg [6]. Среди соединений $R-Y(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ наблюдаемая разница достигает 18 раз при $\Delta H = 70$ кЭ при замещении Ho на Y на 60% [12, 13, 19]. Из сравнения результатов исследования ΔS_m серии соединений $R_{0.4}Y_{0.6}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$, где $R = Ho$ [13], Eg [12] и Tm (настоящая работа), следует, что превышение значений ΔS_m низкотемпературного максимума уменьшается от Ho к Tm, что можно объяснить совокупностью факторов: уменьшением молекулярного магнитного момента соединения и возможным увеличением поля магнито-кристаллической анизотропии при температурах, соответствующих “низкотемпературным” максимумам ΔS_m .

Рассмотрим более подробно зависимость $\Delta S_m(T)$ для соединения $Tm_{0.8}Y_{0.2}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$, представленную на вставке рис. 6. На данной зависимости наблюдается три экстремума: первый соответствует фазовому переходу “порядок–беспорядок” и наблюдается при T_c , два других наблюдаются при температурах ниже T_c в магнитоупорядоченной области температур и качественно соответствуют наблюдаемому на зависимостях восприимчивости $\chi_{hf}(T)$ дополнительным максимумам. Экстремум при $T < T_{comp}$ является “низкотемпературным” пиком. И последний экстремум при $T_{comp} < T < T_c$

наблюдается в области обратного МКЭ [20]. При $x \leq 0.6$ наблюдаются все описанные выше экстремумы ΔS_m и отличаются преимущественно максимальными значениями. В соединении с $x = 0.8$ наблюдается только два из описанных выше экстремумов. Соединение с $x = 1$ обладает одной плато-подобной зависимостью при температурах ниже T_c , что может быть связано с парамагнетизмом части атомов кобальта [13].

На рис. 7 представлены приведенные к значению ΔS_m в T_c температурные зависимости ΔS_m ($\Delta S_m/\Delta S_{T_c}(T)$) соединения $Tm_{0.6}Y_{0.4}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ в различных по напряженности приложенных магнитных полях. Значения $\Delta S_m/\Delta S_{T_c}$ “низкотемпературного” максимума увеличиваются с ростом ΔH , что объясняется большей восприимчивостью к магнитному полю при этих температурах, чем в T_c , из-за слабого $R-3d$ обменного взаимодействия. Следовательно, даже приложенного внешнего магнитного поля напряженностью 90 кЭ недостаточно для упорядочения R -магнитной подрешетки. Аналогичные зависимости значений $\Delta S_m/\Delta S_{T_c}$ “низкотемпературных” максимумов от напряженности магнитного поля наблюдаются во всех исследованных образцах.

На рис. 8 представлены усредненные экспериментальные данные температурных зависимостей адиабатического изменения температуры. Разброс экспериментальных данных относитель-

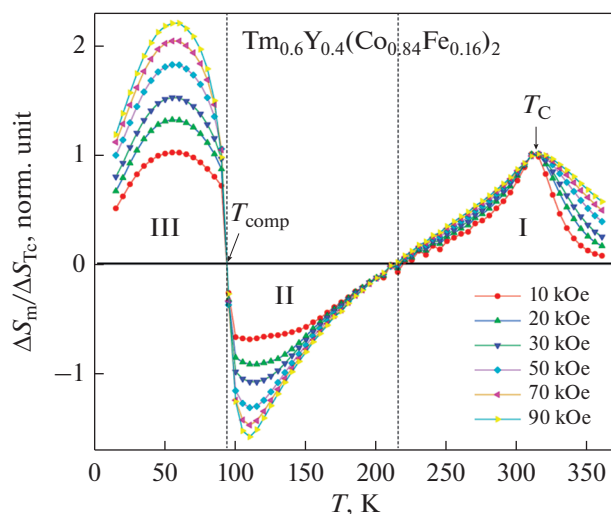


Рис. 7. Приведенные температурные зависимости изменения магнитной части энтропии соединения $Tm_{0.6}Y_{0.4}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ в различных по напряженности магнитных полях. Вертикальные пунктирные линии отделяют температурные области I, II и III.

но усредненных значений не превышает ± 0.05 К для прямого МКЭ и ± 0.10 К для обратного МКЭ. Сравнение зависимостей $\Delta T_{ad}(T)$ и $\Delta S_m(T)$ демонстрирует их качественную идентичность. Невысокие значения ΔT_{ad} , даже в сравнении с родственными соединениями на основе $ErCo_2$ [2, 21], и чередование прямого и обратного МКЭ не позволяют рекомендовать данные материалы как рабочие тела классических магнитных холодильных машин. С другой стороны, данные соединения демонстрируют обратный МКЭ в диапазоне температур ~ 100 К с максимальными значениями $\Delta S_m = 0.45$ Дж/(кг К), что значительно больше, чем в других родственных соединениях на основе RCo_2 [12, 13, 19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, по результатам исследования магнитных и магнитотепловых свойств квазибинарных соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ было показано разнообразие магнитных и магнитотепловых свойств исследованной системы в зависимости от состава и приложенного внешнего магнитного поля:

1. На температурных зависимостях намагниченностей соединений, обладающих точкой компенсации магнитных моментов подрешеток в полях, меньших 1 кЭ, наблюдается инверсия намагниченности.

2. На кривой намагничивания соединения $Tm_{0.4}Y_{0.6}(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$ при температуре 5 К обна-

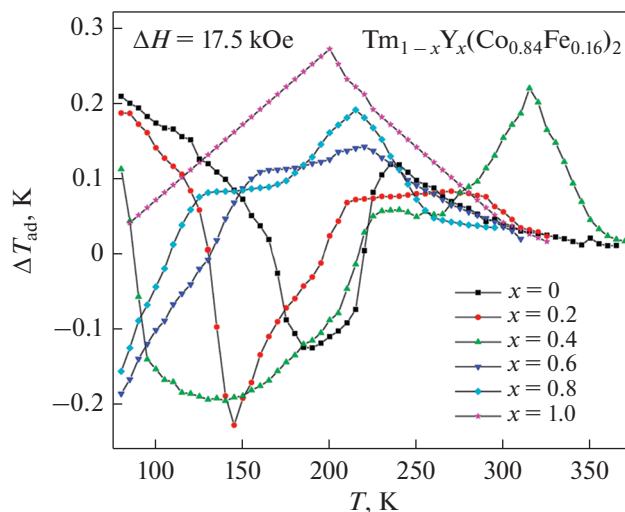


Рис. 8. Температурные зависимости адиабатического изменения температуры $\Delta T_{ad}(T)$ при $\Delta H = 17.5$ кЭ для соединений $Tm_{1-x}Y_x(Co_{0.84}Fe_{0.16})_2$.

ружен перегиб при $H \approx 49.5$ кЭ, природа возникновения которого до конца не установлена.

3. В соединениях с $x \leq 0.2$ максимальные значения ΔS_m при низких температурах превышают значения ΔS_m при T_c до 12 раз.

4. В образцах соединений с $x = 0.4$ и 0.6 наблюдается обратный МКЭ в широком температурном диапазоне. Абсолютные значения ΔS_m и ΔT_{ad} обратного МКЭ в этих соединениях по модулю превышают значения ΔS_m и ΔT_{ad} прямого МКЭ. Это представляет практический интерес в разработке широкодиапазонных магнитных холодильных машин, использующих обратный МКЭ.

Работа выполнена при поддержке Государственного контракта FEUZ-2020-0051 между УрФУ и Министерством высшего образования РФ, и с использованием оборудования УЦКП “Современные нанотехнологии” УрФУ (рег. № 2968), при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (Проект 075-15-2021-677).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Franco V., Blázquez J.S., Ipus J.J., Law J.Y., Moreno-Ramírez L.M., Conde A. Magnetocaloric effect: From materials research to refrigeration devices // Prog. Mater. Sci. 2018. V. 93. P. 112–232.
2. Anikin M., Tarasov E., Kudrevatykh N., Inishev A., Semkin M., Volegov A., Zinin A. Features of magnetic and thermal properties of $R(Co_{1-x}Fe_x)_2$ ($x \leq 0.16$) quasibinary compounds with $R = Dy, Ho, Er$ // J. Magn. Mater. 2016. V. 418. P. 181–187.
3. Chaaba I., Othmani S., Haj-Khlifa S., de Rango P., Fruchart D., Cheikhrouhou-Koubaa W., Cheikhrouhou A. Magnetic and magnetocaloric properties

- of $\text{Er}(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_2$ intermetallic compounds // *J. Magn. Magn. Mater.* 2017. V. 439. P. 269–276.
4. Anikin M.S., Tarasov E.N., Kudrevatykh N.V., Volegov A.S., Zinin A.V. Magnetic properties of $\text{R}(\text{Co}_{0.88}\text{Fe}_{0.12})_2$ quasi-binary compounds // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1389. P. 012061.
 5. Belorizky E., Freym M.A., Gavigan J.P., Givord D., Li H.S. Evidence in rare-earth (*R*)-transition metal (*M*) intermetallics for a systematic dependence of *R*-*M* exchange interactions on the nature of the *R* atom // *J. Appl. Phys.* 1987. V. 61. P. 3971.
 6. Аникин М.С., Тарасов Е.Н., Кудреватых Н.В., Инисhev А.А., Зинин А.В. Магнитные и магнитотепловые свойства материалов на основе фаз Лавеса $\text{R}(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_2$ с тяжелыми редкоземельными металлами // *Митом* 2018. V. 758. № 8. P. 36–41.
 7. Balli M., Fruchart D., Gignoux D. A study of magnetism and magnetocaloric effect in $\text{Ho}_{1-x}\text{Tb}_x\text{Co}_2$ compounds // *J. Magn. Magn. Mater.* 2007. V. 314. P. 16–20.
 8. Cwik J. Effect of partial Gd substitution on the magnetic and magnetocaloric properties in Dy–Ho–Gd–Co multicomponent compounds // *Phys. Status Solidi B.* 2013. V. 250. № 9. P. 1926–1931.
 9. Rodriguez-Carvajal J. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction // *Physica B.* 1993. V. 192. P. 55–69.
 10. Andreev A.V., Gorbunov D.I., Sebek J., Neznakhin D.S. Influence of Co on the magnetism of HoFe_5Al_7 // *J. Alloys Compd.* 2018. V. 731. P. 135–142.
 11. Gorbunov D.I., Andreev A.V., Neznakhin D.S., Henriques M.S., Sebek J., Skouriski Y., Danis S., Wosnitza J. Magnetic properties of $\text{DyFe}_{5-x}\text{Co}_x\text{Al}_7$: Suppression of exchange interactions and magnetocrystalline anisotropy by Co substitution // *J. Alloys Compd.* 2018. V. 741. P. 715–722.
 12. Anikin M.S., Tarasov E.N., Kudrevatykh N.V., Neznakhin D.S., Semkin M.A., Selezneva N.V., Andreev S.V., Zinin A.V. Magnetic and magneto-thermal properties of ferrimagnetic alloys $(\text{Er}_{1-x}\text{Y}_x)(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$ and their dependence on the orientations of resultant and sublattice magnetizations // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2021. V. 33. P. 275801.
 13. Аникин М.С., Тарасов Е.Н., Незнахин Д.С., Сёмкин М.А., Селезнёва Н.В., Андреев С.В., Рагозина М.В., Зинин А.В. Магнитные и магнитотепловые свойства соединений $\text{Ho}_{1-x}\text{Y}_x(\text{Co}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_2$ // *ФТТ.* 2021. V. 63. № 11. P. 1795–1800.
 14. Brommer P.E., Dubenko I.S., Franse J.J.M., Levitin R.Z., Markosyan A.S., Radwański R.J., Snegirev V.V., Sokolov A.V. Field-induced noncollinear magnetic structures in Al-stabilized RCO_2 Laves phases // *Physica B.* 1993. V. 183. P. 363–368.
 15. Brommer P.E., Dubenko I.S., Franse J.J.M., Kayzel F., Kolmakova N.P., Levitin R.Z., Markosyan A.S., Sokolov A.Yu. Phase transitions induced by magnetic field in ferrimagnets with one unstable magnetic subsystem // *Physica B.* 1995. V. 211. P. 155–268.
 16. Hauser R., Kussbach C., Grossinger R., Hilscher G., Arnold Z., Kamarad J., Markosyan A.S., Chappel E., Chouteau G. On the metamagnetic state in $\text{Er}_{1-x}\text{Tm}_x\text{Co}_2$ (*T* = Y, Tm) compounds // *Physica B.* 2001. V. 294–295. P. 182–185.
 17. Kilcoyne S.H. The evolution of magnetic correlations and onset of magnetic order in $\text{Y}(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_2$ // *Physica B.* 2000. V. 296–298. P. 660–661.
 18. Neves Bez H., Yibole H., Pathak A., Mudryk Y., Pecharsky V.K. Best practices in evaluation of the magnetocaloric effect from bulk magnetization measurements // *J. Magn. Magn. Mater.* 2018. V. 458. P. 301–309.
 19. Anikin M.S., Tarasov E.N., Kudrevatykh N.V., Semkin M.A., Volegov A.S., Inishev A.A., Zinin A.V. Features of Magnetocaloric Effect in $\text{Er}(\text{Co-Fe})_2$ Laves phases // in *IV Sino-Russian ASRTU Symposium on Advanced Materials and Materials and Processing Technology*, KnE Materials Science. 2016. V. 2016. P. 5–10.
 20. Андреев А.С., Белов К.П., Никитин С.А., Тишин А.М. Магнитотепловые эффекты в редкоземельных магнетиках // *Успехи физ. наук.* 2018. V. 458. P. 301–309.
 21. Gerasimov E.G., Inishev A.A., Mushnikov N.V., Terentev P.B., Gaviko V.S., Anikin M.S. Magnetocaloric effect, heat capacity and exchange interactions in non-stoichiometric $\text{Er}_{0.65}\text{Gd}_{0.35}\text{Co}_2\text{Mn}_x$ compounds // *Intermetallics.* 2022. V. 140. P. 107386.