

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622

МАГНИТОТЕПЛОВЫЕ И МАГНИТОСТРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФАЗ ЛАВЕСА Tb(Co,In)₂

© 2024 г. Д. А. Морозов^{а, *}, Г. А. Политова^{а, b}, М. А. Ганин^а, М. Е. Политов^с,
А. Б. Михайлова^а, А. В. Филимонов^b

^а Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН, Ленинский просп., д. 49, Москва,
119334 Россия

^b Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29,
Санкт-Петербург, 195251 Россия

^с Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский
университет), ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005 Россия

* e-mail: morozoww96@mail.ru

Поступила в редакцию 17.11.2023 г.

После доработки 26.01.2024 г.

Принята к публикации 02.02.2024 г.

Впервые получены многокомпонентные поликристаллические твердые растворы TbIn₂Co_{2-*x*} (*x* = 0 – 0.2) и изучены их кристаллическая структура, магнитные, магнитокалорические и магнито-стрикционные свойства. Рентгенограммы, полученные при комнатной температуре, демонстрируют преимущественное наличие кубической фазы Лавеса C15 во всех исследуемых образцах. Обнаружено, что при увеличении содержания индия до *x* = 0.1 параметр решетки увеличивается, а при дальнейшем увеличении до *x* = 0.2 – уменьшается. Температура Кюри *T_C* при этом монотонно возрастает до 245 К. Изотермическое изменение энтропии ΔS_{mag} рассчитано в соответствии с магнитными измерениями с использованием термодинамического соотношения Максвелла. При изменении внешнего магнитного поля от 0 до 1.8 Тл максимальное изменение энтропии монотонно уменьшается и для состава *x* = 0.2 составляет 1.8 Дж/(кг·К). Обнаружен рост величины объемной магнито-стрикции по мере увеличения содержания индия до *x* = 0.05. При дальнейшем увеличении концентрации индия пиковые значения снижаются и смещаются в область более высоких температур.

Ключевые слова: редкоземельные интерметаллиды, фаза Лавеса, магнитные свойства, магнито-стрикция, магнитокалорический эффект

DOI: 10.31857/S0015323024040081, **EDN:** WQRADN

ВВЕДЕНИЕ

Интерметаллиды RCo₂ (R – редкоземельный металл) кристаллизуются в кубическую структуру типа MgCu₂ (структура типа фаз Лавеса (C15), пространственная группа Fd3m), в которой атомы R образуют решетку типа алмаз, а оставшееся пространство внутри ячейки занято правильными тетраэдрами, состоящими из атомов Co [1]. Такие соединения с тяжелыми редкоземельными элементами являются коллинеарными ферромагнетиками и имеют две магнитные подсистемы. Одну из подсистем образуют локализованные R-моменты, а другую – моменты коллективизированных 3*d*-электронов кобальта, гибридизованных с редкоземельными 5*d*-электронами. Обмен между *d*-электронами недостаточен для спонтанного расщепления зон, поэтому соединения с немагнитными ред-

коземельными элементами (YCo₂, LuCo₂) являются обменно-усиленными парамагнетиками, а намагниченность *d*-электронной подсистемы в соединениях с магнитными редкоземельными элементами обусловлена 4*f*–3*d*-обменным взаимодействием, наиболее сильным в GdCo₂ [2]. Соединения RCo₂ проявляют метамагнитные свойства, которые играют решающую роль в определении типа фазового перехода в магнитоупорядоченное состояние (при температуре Кюри). Так температуры Кюри соединений варьируются от 33.6 К (для ErCo₂ – переход первого рода) до 398 К (для GdCo₂ – переход второго рода). Также в этих соединениях может возникнуть фазовый переход, индуцированный внешним магнитным полем. Отметим, что нестехиометрические составы, например, TbCo₂Mn_{*x*} (0 ≤ *x* ≤ 0.6) с кубической структурой типа MgCu₂, несмотря на отклонение соотношения

Tb к 3d-металлу от стехиометрии, обладают большой объемной и анизотропной магнитострикцией в широком диапазоне температур [3].

Перечисленные особенности оказывают большое влияние на структурные, магнитные, тепловые и транспортные свойства, что позволяет рассматривать эти соединения как перспективные материалы для приборостроения.

Магнитные соединения $R\text{Co}_2$ часто проявляют интересные магнитные свойства вблизи температуры Кюри, такие как гигантский магнитокалорический эффект (МКЭ) [1–22], гигантский магнитообъемный эффект [5, 23, 24], метамагнитный переход системы коллективизированных электронов [13, 18, 25]. Основываясь на подобных уникальных свойствах, можно создавать нестандартные инструменты для реализации специальных функций. Одним из примеров является технология магнитного охлаждения, которая, в зависимости от интенсивности МКЭ, отличается высокой энергоэффективностью и экологичностью. На первый план выходит задача поиска материалов с большими МКЭ в малых полях, которые были бы созданы из нетоксичных элементов и являлись бы эффективными теплоносителями, работающими на высоких частотах [26, 27].

Эти явления в области магнитного фазового перехода часто проявляются совместно, демонстрируя связь между магнитными, структурными и электронными особенностями материала. Эта связь позволяет управлять свойствами материалов различными способами, такими как изменение температуры, магнитного поля, давления внешней среды и изменения химического состава. Осуществляя частичные замещения как в R-подрешетке, так и в подрешетке кобальта, можно варьировать температуру Кюри и величину наблюдаемых в ее области эффектов [28, 29]. Известно, что частичная замена Co на p-элементы, такие как Al или Ga, приводит к увеличению параметра решетки, увеличению температуры Кюри и может привести к росту адиабатического изменения температуры и магнитной части энтропии при изменении воздействующего магнитного поля, характеризующих МКЭ [24, 28]. В данной работе предлагается изучить структуру и магнитные свойства ранее не изученной системы замещенных соединений $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$, где в качестве замещающего p-элемента выступают атомы индия с незаполненной 5p-электронной оболочкой.

ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Поликристаллические образцы твердых растворов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) бы-

ли получены методом дуговой плавки в медном водоохлаждаемом тигле в атмосфере защитного газа аргона высокой чистоты. Высокочистые металлы (Co 99.99%, редкоземельные металлы Tb и In 99.9%) были подобраны в стехиометрических соотношениях. Выплавку производили трехкратно для обеспечения достаточной однородности. Полученные отливки были завернуты в танталовую фольгу, запечатаны в вакуумированные кварцевые ампулы и отожжены при температуре 850°C в течение 40 ч.

Рентгеновские спектры порошкообразных образцов получены в $\text{CuK}\alpha$ -излучении при комнатной температуре на дифрактометре Ultima IV (Rigaku, Япония). Рентгеноструктурный и фазовый анализ полученных образцов проведен с использованием пакета программ PDXL, интегрированного с международной базой данных ICDD, а также с использованием пакета программ MAUD по методу Ритвельда.

Намагниченность образцов измерена с помощью индукционного магнитометра (измерительная вставка для установки MagEq MMS 901, AMT&C, Москва, Россия) в магнитных полях до 1.8 Тл в диапазоне температур 90–350 К. Рассчитана удельная намагниченность полученных составов.

Для оценки магнитокалорического эффекта косвенным методом рассчитаны изменения магнитной части энтропии путем интегрирования полевых зависимостей намагниченности в соответствии с соотношением Максвелла.

Продольная и поперечная магнитострикция измерены тензометрическим методом в температурном диапазоне 80–320 К в магнитных полях до 1.2 Тл. Измерения проводили при помощи тензорезисторов с коэффициентом чувствительности 2.15 и сопротивлением 120 Ом. При измерениях использована компенсационная схема, при которой один тензорезистор приклеивали клеем БФ-2 к поверхности образца, второй — к кварцевой пластине. Выходной сигнал тензорезисторов поступал на мостовую схему и регистрировался оборудованием установки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кристаллическая структура. Для определения типа структуры твердых растворов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ и оценки изменения параметров решетки с увеличением содержания индия был использован метод рентгеновской дифракции.

На рис. 1 показаны дифрактограммы образцов, отмечены угловые положения рефлексов, соответствующие структуре типа C15. Как вид-

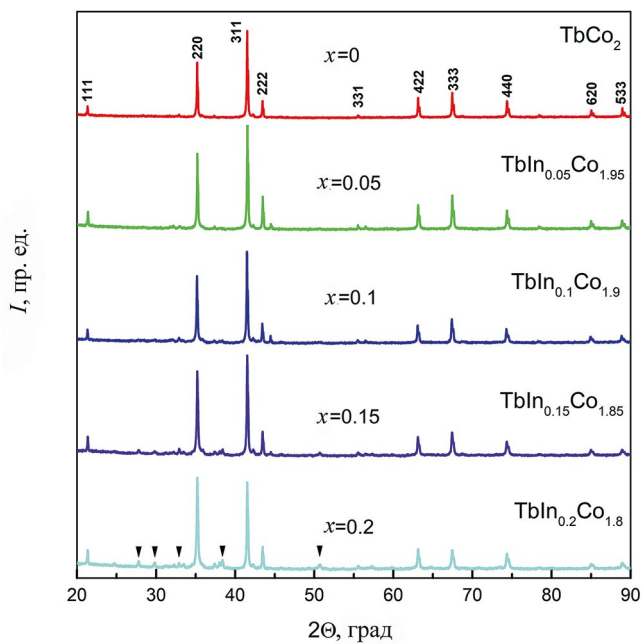


Рис. 1. Дифракционные спектры при комнатной температуре для $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$). Цифрами обозначены рефлексы, соответствующие кубической структуре C15.

но из рисунка, основные рефлексы полученного спектра соответствуют ожидаемым для структуры типа C15 (пространственная группа $\text{Fd}3\text{m}$). С увеличением содержания индия появляются новые рефлексы, наиболее заметные для образцов с $x = 0.15$ и $x = 0.2$, свидетельствующие о появлении фазы $\text{Tb}_{11}\text{Co}_4\text{In}_9$, содержание которой в сплаве $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$ достигает 20 % (отмечены на дифрактограмме для $x = 0.2$).

Сплавы $\text{Tb}_{11}\text{Co}_4\text{In}_9$ с орторомбической решеткой (структура типа $\text{Nd}_{11}\text{Pd}_4\text{In}_9$, пространственная группа Cmmm) изучают недавно, как показано в работе [11], температура их магнитного упорядочения составляет около 100 К.

Следовательно, эта фаза не оказывает существенного влияния на магнитные свойства изучаемых нами соединений в области более высоких температур. Таким образом, установлено,

что во всех исследованных твердых растворах $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) присутствует кубическая фаза Лавеса C15 типа MgCu_2 в качестве основной фазы.

Параметры решетки изученных соединений приведены в табл. 1. С увеличением содержания индия до $x = 0.1$ параметр решетки основной фазы сначала увеличивается. Это связано с тем, что кобальт замещается индием, имеющим больший атомный радиус.

При дальнейшем увеличении содержания индия параметр решетки начинает уменьшаться, что, предположительно, связано с замещением индием не только кобальта, но и тербия, который имеет еще больший, чем у индия, атомный радиус.

Магнитные свойства. Намагниченность соединений измерена в интервале температур от 90 до 350 К. Данные по намагничиванию в магнитном поле 1.8 Тл приведены в табл. 1. На рис. 2а показаны петли гистерезиса соединений при 90 К. Кривые намагничивания соединений не выходят на насыщение в заданных условиях. С увеличением содержания индия удельная намагниченность образцов уменьшается. Петли гистерезиса незначительно расширяются (вставка на рис. 2а), что, по-видимому, вызвано наличием второй фазы.

Температуру Кюри T_C соединений определяли как по пику температурной зависимости dM/dT , так и термодинамическим методом Белова–Арротта. На примере $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$ на рис. 2б показаны изотермы намагниченности, температурные зависимости удельной намагниченности (рис. 3а) и кривые Белова–Арротта (рис. 3б). Значения температуры Кюри для приведенного твердого раствора хорошо согласуются между собой ($T_C = 247$ К методом Белова–Арротта и $T_C = 245$ К, соответствующее пику температурной зависимости удельной намагниченности).

Магнитокалорический эффект. Наиболее распространенным подходом к косвенному измерению МКЭ является использование изотерм удельной намагниченности, измеренных вблизи перехода [1].

Таблица 1. Структурные и магнитные свойства соединений $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$)

Соединение	<i>a</i> , нм	<i>V</i> , нм ³	<i>T</i> _С , К	<i>M</i> , А·м ² /кг при 1.8 Тл, 90 К	−Δ <i>S</i> _{mag max} , Дж/Кг·К при 1.8 Тл
TbCo ₂	0.7208	374.65	231	86.7	2.9
TbIn _{0.05} Co _{1.95}	0.7215	375.59	234	80.4	2.7
TbIn _{0.1} Co _{1.9}	0.7216	375.74	238	78.0	2.4
TbIn _{0.15} Co _{1.85}	0.7214	375.43	240	75.9	2.15
TbIn _{0.2} Co _{1.8}	0.7212	375.12	245	65.7	1.8

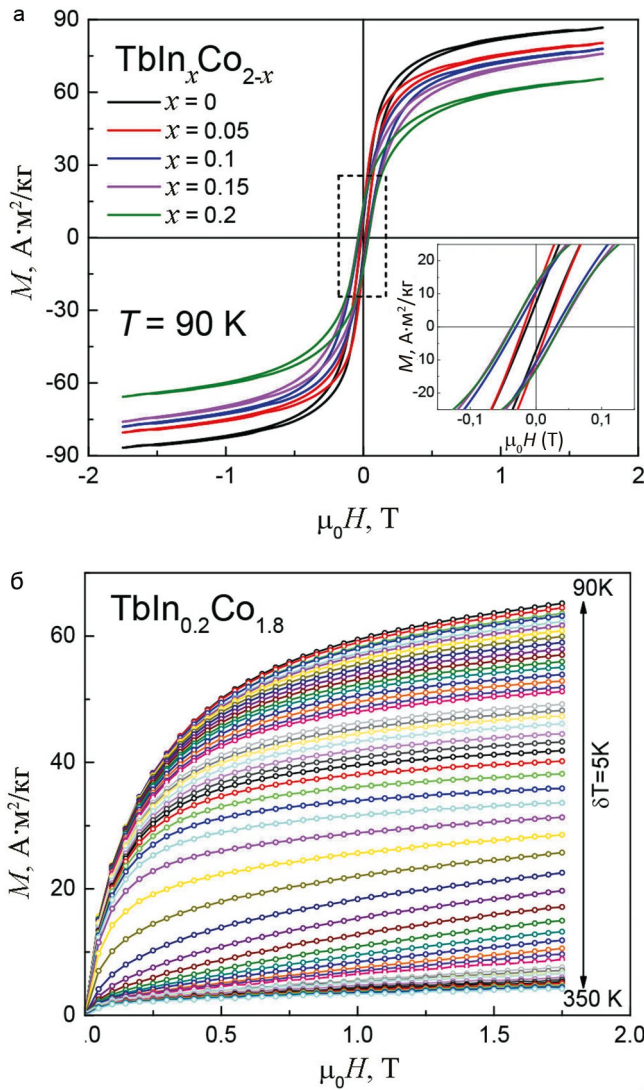


Рис. 2. Петли гистерезиса удельной намагниченности для $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$), вставка: увеличенный фрагмент (а), и изотермы удельной намагниченности $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$, измеренные при различных температурах (б).

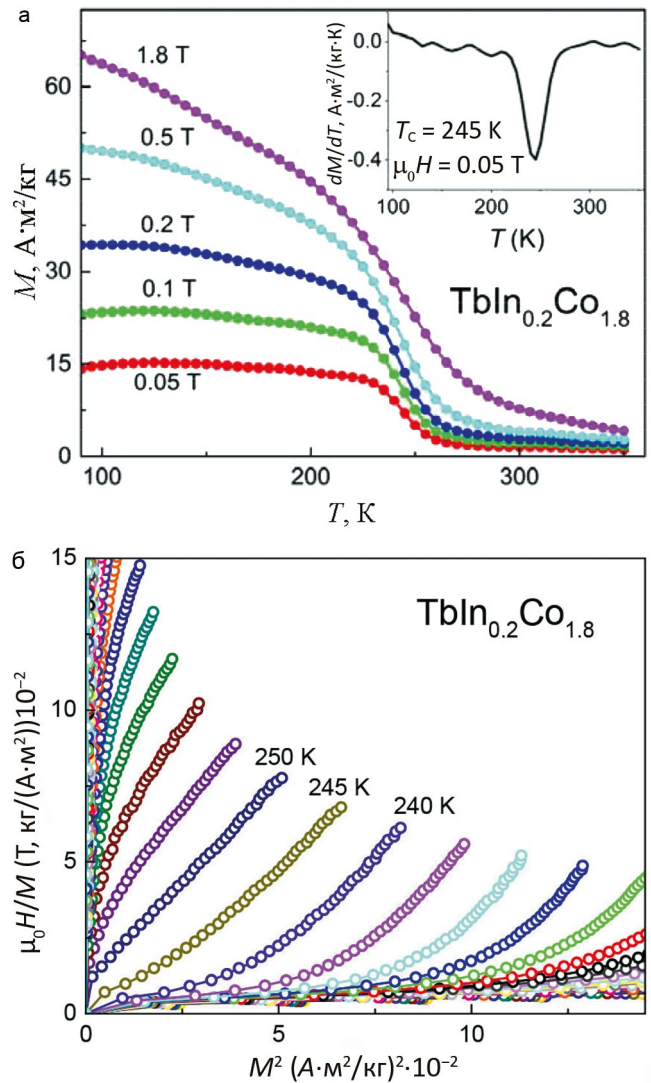


Рис. 3. Температурные зависимости намагничивания, вставка: температурная зависимость производной удельной намагниченности по температуре при $\mu_0 H = 0.05$ Тл (а) и кривые Белова–Аррота для твердого раствора $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$ (б).

На рис. 4а представлена температурная зависимость магнитокалорического эффекта — изменение магнитной части энтропии ($-\Delta S$) для $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$ при изменении внешнего магнитного поля от 0 до 1.8 Тл.

Расчеты выполнялись с использованием соотношения Максвелла (1):

$$\Delta S_M = \int_0^H \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H dH. \quad (1)$$

Как показано на рис. 4а, для состава $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$ вблизи температуры упорядочения 245 К изменения магнитной части энтропии принимают максимальные значения и составляют $|\Delta S_{\text{mag}}| = 1.75$ Дж/кг·К. Размытый пик в области 160 К может быть вызван, по-види-

мому, наличием второй фазы. Гистерезис полевых зависимостей изменения магнитной части энтропии вблизи температуры Кюри отсутствует, ΔS_{mag} увеличивается практически линейно (вставка на рис. 4а). Для остальных исследованных составов температурные и полевые зависимости ΔS_{mag} имеют аналогичный вид.

На рис. 4б показана зависимость ΔS_{mag} от температуры для всех составов. Обнаружено, что в максимальном магнитном поле 1.8 Тл с ростом концентрации индия пиковые значения магнитной части энтропии уменьшаются, смещаясь в область более высоких температур, что согласуется с увеличением температуры Кюри. Максимальные значения изменения магнитной

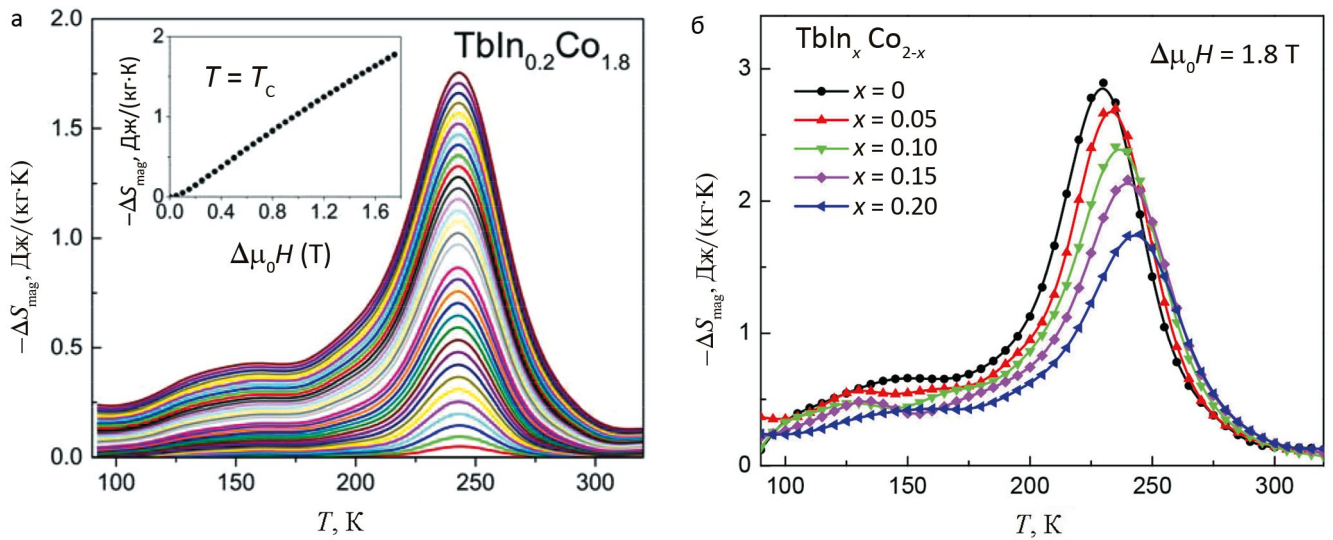


Рис. 4. Температурные зависимости изменения магнитной части энтропии ΔS_{mag} для $\text{TbIn}_{0.2}\text{Co}_{1.8}$ вблизи температуры упорядочения, вставка: полевая зависимость $-\Delta S_{\text{mag}}$ (а), и составов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) при максимальном изменении магнитного поля до 1.8 Тл (б).

части энтропии при изменении магнитного поля до 1.8 Тл представлены в табл. 1.

Магнитострикция. В работе тензометрическим методом исследована магнитострикция в диапазоне температур 80–350 К во внешних магнитных полях до 1.2 Тл. Магнитное поле было ориентировано как параллельно, так и перпендикулярно направлению тензометрического измерения, что позволило регистрировать как продольную, так и поперечную магнитострикцию соответственно.

Получены температурные и полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикции твердых растворов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$). На рис. 5 на примере состава $\text{TbIn}_{0.15}\text{Co}_{1.85}$ показаны температурные зависимости продольной (рис. 5а) и поперечной (рис. 5б)

магнитострикции при внешнем магнитном поле 0.15 Тл, 0.3 Тл, 0.5 Тл, 0.8 Тл и 1.2 Тл.

Видно, что значение продольной магнитострикции положительно, составляет $1770 \cdot 10^{-6}$ при 80 К во внешнем поле 1.2 Тл и уменьшается с ростом температуры. Поперечная магнитострикция отрицательна при низких температурах ($-500 \cdot 10^{-6}$ при 1.2 Тл), с ростом температуры уменьшается по абсолютному значению и меняет знак при $T_c = 240$ К, где наблюдается ее максимум.

На рис. 6 показаны полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикции составов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ при 100 К. Видно, что как у исходного состава TbCo_2 , так и у всех замещенных, продольная магнитострикция при низких температурах положительна, а поперечная — отри-

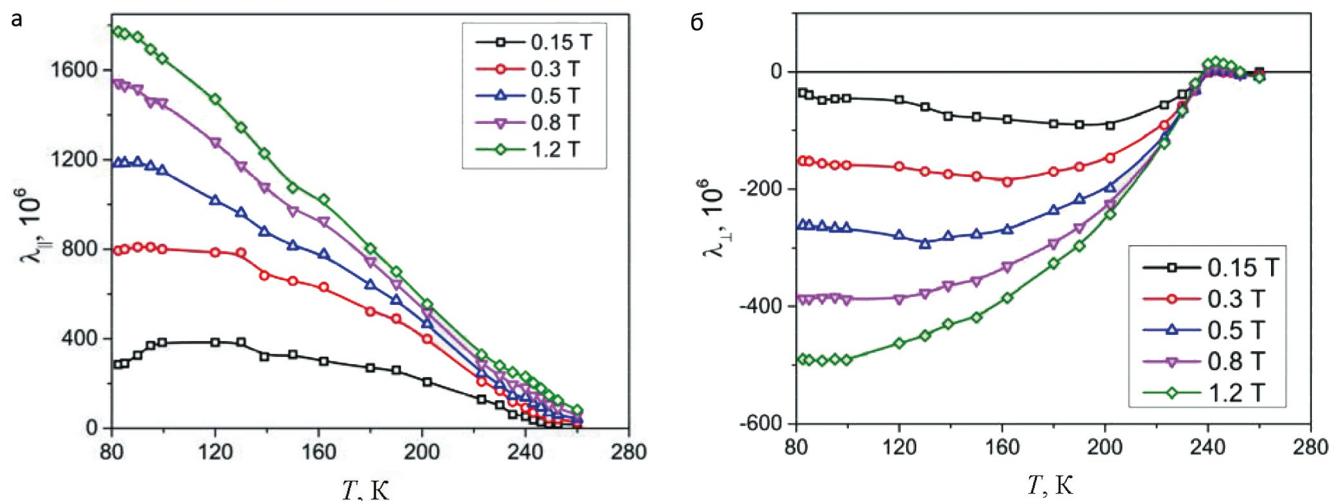


Рис. 5. Температурные зависимости продольной (а) и поперечной (б) магнитострикции сплава $\text{TbIn}_{0.15}\text{Co}_{1.85}$.

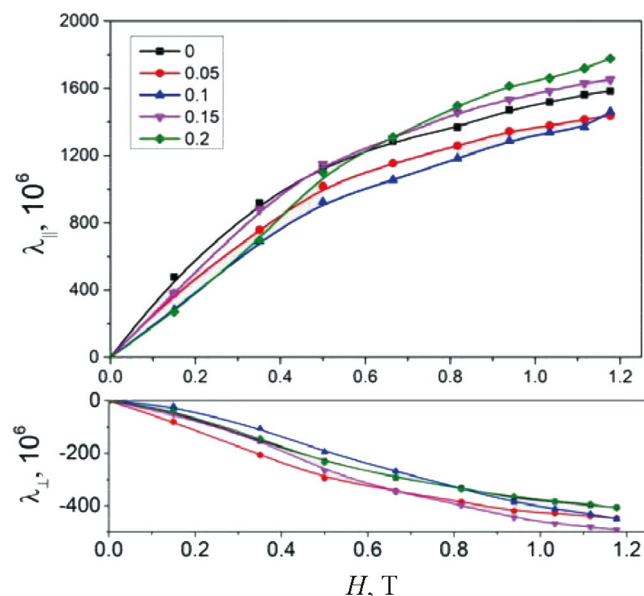


Рис. 6. Полевые зависимости продольной и поперечной магнитострикции составов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) при 100 К.

цательна. В области низких температур частичное замещение кобальта индием незначительно влияет на магнитострикционные свойства, сохраняя их высокие значения. Однако заметим, что величины магнитного поля 1.2 Тл недостаточно для выхода кривых на насыщение.

Известно, что в составах RCO_2 в области температуры Кюри кроме МКЭ наблюдается и магнитообъемный эффект [30]. Для оценки объемного изменения образца под действием магнитного поля удобно воспользоваться таким понятием, как объемная магнитострикция.

Объемную магнитострикцию определяли по соотношению:

$$\lambda_{\omega} = \lambda_{||} + 2\lambda_{\perp}. \quad (2)$$

Полученные полевые зависимости объемной магнитострикции составов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) при температуре Кюри приведены на рис. 7. Видно, что с ростом величины магнитного поля индуцированная полем объемная магнитострикция монотонно увеличивается для всех составов, не выходя на насыщение в поле 1.2 Тл.

Максимального значения в поле 1.2 Тл объемная магнитострикция достигает в составе с содержанием индия $x = 0.05$. С дальнейшим увеличением его содержания значения объемной магнитострикции снижаются.

На рис. 8 показаны температурные зависимости объемной магнитострикции в области температур Кюри для всех исследованных соединений. На этом рисунке также хорошо видно, что наибольшим значением объемной магнитострикции

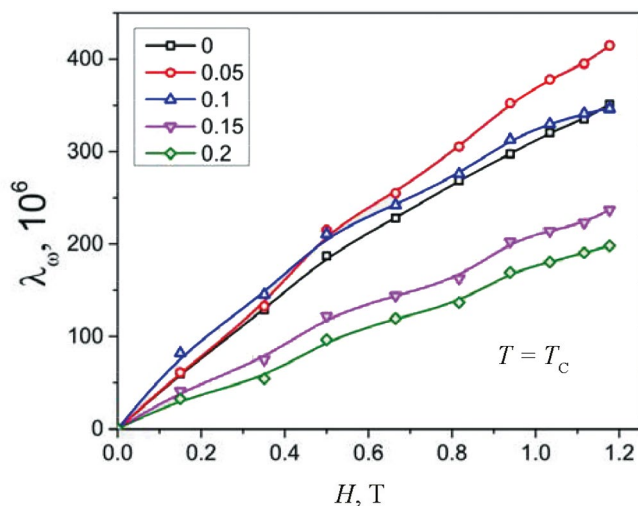


Рис. 7. Полевые зависимости объемной магнитострикции составов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) при температуре Кюри.

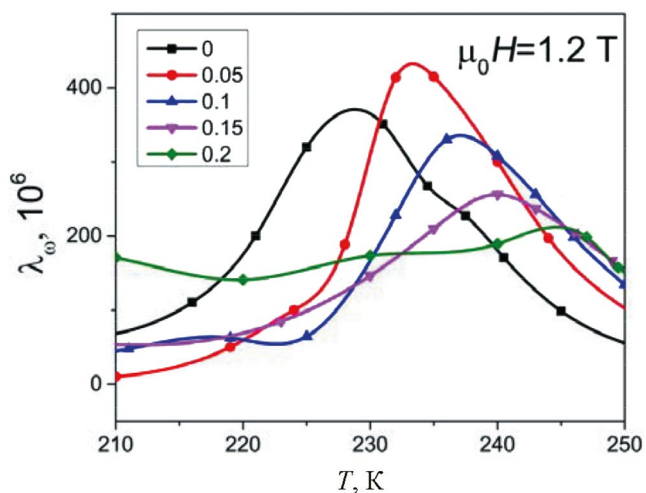


Рис. 8. Температурные зависимости объемной магнитострикции составов $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) вблизи температуры Кюри.

в максимальном магнитном поле 1.2 Тл в области температуры Кюри обладает состав $\text{TbIn}_{0.05}\text{Co}_{1.95}$.

Если сравнить рис. 4б и рис. 8, то хорошо заметна корреляция между магнитокалорическим и магнитообъемным эффектами в этих составах в области температуры Кюри, наблюдаемая ранее для других составов [18]. Однако, в отличие от МКЭ, изменение объемной магнитострикции при частичном замещении кобальта индием не монотонно.

ВЫВОДЫ

Впервые получены твердые растворы $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ ($x = 0, 0.5, 0.1, 0.15, 0.2$). Показано, что все составы в качестве основной фазы

имеют фазу Лавеса Cu_{15} с кубической структурой MgCu_{15} , однако с увеличением содержания индия возрастает количество побочной фазы $\text{Tb}_{11}\text{Co}_4\text{In}_9$, достигающей 20% для состава $x = 0.2$. Параметр решетки основной фазы изменяется немонотонно, демонстрируя максимум при $x = 0.1$, что связано с различием атомных радиусов кобальта, индия и тербия.

Исследованы магнитные, магнитокалорические и магнитоэлектрические свойства полученных составов. При увеличении содержания индия температура Кюри смещается в область более высоких температур (на 15 градусов при $x = 0.2$), при этом удельная намагниченность уменьшается.

В области температуры Кюри наблюдается магнитотепловой и магнитообъемный эффекты, ослабевающие с ростом содержания индия. Максимальные значения изменения магнитной части энтропии уменьшаются монотонно, от 2.9 до 1.8 Дж/Кг·К при 1.8 Тл. Объемная магнитоэлектрическая при T_C для состава $x = 0.05$ увеличивается до $420 \cdot 10^{-6}$, а затем монотонно уменьшается. В области низких температур частичное замещение кобальта индием на магнитоэлектрические свойства влияет незначительно, сохраняя высокие значения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований № 075-00320-24-00. Работа А.В. Филимонова выполнена в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований FSEG-2023-0016.

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tishin A.M., Spichkin Y.I.* The magnetocaloric effect and its applications. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia. 2003. 480 p.
2. *Gratz E., Markosyan A.S.* Physical properties of RCo_2 Laves phases // *J. Phys. Condensed Matter*. 2001. V. 13. P. 385–413.
3. *Gerasimov E.G., Inishev A.A., Terentev P.B., Kazantsev V.A., Mushnikov N.V.* Magnetostriction and thermal expansion of nonstoichiometric TbCo_2Mn_x compounds // *J. Magn. Magn. Mater.* 2021. V. 523. P. 167628.
4. *Дубенко И.С., Звездин А.К., Лагутин А.С., Левитин Р.З., Маркосян А.С., Платонов В.В., Таценко О.М.* Исследование метамагнитных переходов в зонной d подсистеме интерметаллидов RCO_2 в сверхсильных магнитных полях до 300 Тл // *Письма в ЖЭТФ*. 1996. Т. 64. Вып. 3. С. 188–192.
5. *Cwik J., Kolchugina N., Nenkov K.* Effect of partial Ho-substitution on the magnetic and magnetocaloric properties of polycrystalline DyCo_2 -based solid solutions // *J. Alloys Compounds*. 2013. V. 560. P. 72–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.114>
6. *Александрян В.В., Белов К.П., Левитин Р.З., Маркосян А.С., Снегирев В.В.* Гигантское возрастание температуры Кюри редкоземельных интерметаллических соединений RCO_2 при малых замещениях магнитного кобальта немагнитным алюминием // *Письма ЖЭТФ*. 1984. Т. 40. С. 77.
7. *Nikitin S.A., Tskhadadze G.A., Ovchenkova I.A., Zhukova D.A., Ivanova T.I.* The Magnetic Phase Transitions and Magnetocaloric Effect in the $\text{Ho}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ and $\text{Tb}(\text{Co}_{1-x}\text{Al}_x)_2$ Compounds // *Solid State Phenomena*. 2011. V. 168–169. P. 119–121. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.168-69.119>
8. *Ouyang Z.W., Rao G.H., Yang H.F., Liu W.F., Liu G.Y., Feng X.M., Liang J.K.* Structure and magnetic phase transition in $\text{R}(\text{Co}_{1-x}\text{Ga}_x)_2$ ($\text{R}=\text{Nd}, \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}$) compounds // *Physica B*. 2004. V. 344. P. 436.
9. *Baran S., Tyvanchuk Yu.B., Szytuła A.* Crystal structure and magnetic properties of $\text{R}_{11}\text{Co}_4\text{In}_9$ ($\text{R}=\text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}$ and Er) compounds // *Intermetallics*. 2021. V. 130. P. 107065.
10. *Clark A.E.* Magnetostrictive RFe_2 intermetallic compounds // *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths*, ed. by K.A. Gschneidner Jr. and L. Eyring. Chapter 15. 1979. P. 231–258.
11. *Grössinger R., Sato Turtelli R., Mehmood N.* Materials with high magnetostriction // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2014. V. 60. P. 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/60/1/012002>
12. *Belov K.P.* Magnetostriction Phenomena and Their Technical Application. Moscow: Nauka, 1987. 159 p. [in Russian].
13. *Ren W.J., Zhang Z.D.* Progress in bulk MgCu_2 -type rare-earth iron magnetostrictive compounds // *Chin. Phys. B*. 2013. V. 22 (7). P. 077507.
14. *Engdahl G.* Physics of Giant Magnetostriction, in *Electromagnetism // Handbook of Giant Magnetostrictive Materials*, Ed.: G. Engdahl, Academic Press, San Diego. Chapter 1. 2000. P. 1–125. ISBN 9780122386404. <https://doi.org/10.1016/B978-012238640-4/50017-6>
15. *Tereshina I.S., Politova G.A., Tereshina E.A., Burkhanov G.S., Chistyakov O.D., Nikitin S.A.* Magnetocaloric effect in $(\text{Tb}, \text{Dy}, \text{R})(\text{Co}, \text{Fe})_2$ ($\text{R} = \text{Ho}, \text{Er}$) multicomponent compounds // *J. Phys. Conf. Ser.* 2011. V. 266. P. 012077. 2nd International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA), Sendai, Japan, Jul 12–16, 2010. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/266/1/012077>
16. *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. V. 154. P. 303–310.
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.05.053>
17. Tereshina I., Politova G., Tereshina E., Nikitin S., Burkhanov G., Chistyakov O., Karpenkov A. Magnetocaloric and magnetoelastic effects in $(\text{Tb}_{0.45}\text{Dy}_{0.55})_{1-x}\text{Er}_x\text{Co}_2$ multicomponent compounds // *J. Phys.: Conf. Series*, (ICM 2009). 2010. V. 200. P. 092012.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/200/9/092012>
 18. Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. Magnetocaloric effect from indirect measurements: Magnetization and heat capacity // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 86(1). P. 565–575.
<https://doi.org/10.1063/1.370767>
 19. Игошев П.А. Магнитокалорический эффект и фазовое расслоение: теория и перспективы // *Физика металлов и металловедение*. 2023. Т. 124. № 11. С. 1065–1073.
<https://doi.org/10.31857/S0015323023601058>. — EDN JTMSTQ
 20. Соколовский В.В., Загребин М.А., Бучельников В.Д., Марченков В.В. Современные магнитокалорические материалы: существующие проблемы и перспективы исследований // *ФММ*. 2023. Т. 124. № 11. С. 1019–1024.
<https://doi.org/10.31857/S0015323023601629>. — EDN HIMEEV
 21. Politova G.A., Tereshina I.S., Karpenkov A.Yu., Chzhan V.B., Cwik J. Magnetism, magnetocaloric and magnetostrictive effects in RCo_2 – type (R = Tb, Dy, Ho) laves phase compounds // *J. Magn. Magn. Mater.* Volume 591, 2024, 171700, ISSN 0304–8853.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171700>
 22. Терешина И.С., Овченко Ю.А., Политова Г.А., Панкратов Н.Ю. Материалы на основе RCo_2 и RMnSi для твердотельного магнитного охлаждения // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2023. Т. 87. № 3. С. 353–358.
<https://doi.org/10.31857/S0367676522700624>, EDN: HFYNVW
 23. 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. V. 50 (11). P. 2504604, IEEE International Magnetism Conference (Intermag), Dresden, Germany, May 04–08, 2014.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2324636>
 24. Politova G.A., Tereshina I.S., Cwik J. Multifunctional phenomena in Tb–Dy–Gd(Ho)–Co(Al) compounds with a Laves phase structure: Magnetostriction and magnetocaloric effect // *J. Alloys Comp.* 2020. V. 843. P. 155887.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155887>
 25. Tereshina I., Politova G., Tereshina E., Cwik J., Nikitin S., Chistyakov O., Karpenkov A., Karpenkov D., Palewski T. Magnetostriction in $(\text{Tb}_{0.45}\text{Dy}_{0.55})_{1-x}\text{Er}_x\text{Co}_2$ ($x = 0.1, 0.2$): high-field investigation // *J. Phys.: Conf. Series*. 2011. V. 303. P. 012024.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/303/1/012024>
 26. Соколовский В.В., Мирошкина О.Н., Бучельников В.Д. Обзор современных теоретических методов исследования магнитокалорических материалов // *ФММ*. 2022. Т. 123. № 4. С. 344–402.
<https://doi.org/10.31857/S0015323022040118>. — EDN JSTDQR
 27. 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.
<https://doi.org/10.31857/S0015323022040106>. EDN YAZZZB
 28. Tereshina I.S., Chzhan V.B., Tereshina E.A., Khmelevskiy S., Burkhanov G.S., Ilyushin A.S., Paukov M.A., Havela L., Karpenkov A.Yu., Cwik J., Koshkid'ko Yu.S., Miller M., Nenkov K., Schultz L. Magnetostructural phase transitions and magnetocaloric effect in Tb–Dy–Ho–Co–Al alloys with a Laves phase structure // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 120. P. 013901(10).
<https://doi.org/10.1063/1.4955047>
 29. Панкратов Н.Ю., Терешина И.С., Никитин С.А. Магнитокалорический эффект в редкоземельных магнетиках // *Физика металлов и металловедение*. 2023. Т. 124. № 11. С. 1093–1101.
<https://doi.org/10.31857/S0015323023601095>. EDN FUAHZZM
 30. 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 Mater.* 2018. V. 154. P. 303–310.

Magnetocaloric and Magnetostrictive Properties of the $\text{Tb}(\text{Co}, \text{In})_2$ Laves Phases

D. A. Morozov^{1,*}, G. A. Politova^{1,2}, M. A. Ganin¹, M. E. Politov³, A. B. Mikhailova¹,
A. V. Filimonov²

¹*Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, Moscow, 119334 Russia*

²*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, 195251 Russia*

³*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

*e-mail: morozoww96@mail.ru

Multicomponent polycrystalline $\text{TbIn}_x\text{Co}_{2-x}$ (with $x = 0-0.2$) solid solutions are prepared for the first time, and their crystal structure and magnetic, magnetocaloric, and magnetostrictive properties are studied. X-ray diffraction patterns taken at room temperature demonstrate mainly the presence of the cubic C15 Laves phase in all samples. As the indium content increases to $x = 0.1$, the lattice parameter is found to increase; the further increase in the indium content to $x = 0.2$ leads to a decrease in the lattice parameter. In this case, the Curie temperature T_C monotonically increases to 245 K. The isothermal magnetic entropy change ΔS_{mag} is calculated in accordance with magnetic measurements using the thermodynamic Maxwell's relation. At a magnetic field change from 0 to 1.8 T, the maximum entropy change monotonically decreases and, for composition with $x = 0.2$, is 1.8 J/(kg·K). As the indium content increases to $x = 0.05$, the volume magnetostriction increases. The further increase in the indium concentration leads to the decrease in the peak values and their shift to high temperatures.

Keywords: rare-earth intermetallides, Laves phase, magnetic properties, magnetostriction, magnetocaloric effect