

Научная статья

УДК 621.317.411

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-60-68

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МАГНИТОВ RE–TM–B И RE–TM ДЛЯ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ (обзор)

Д.В. Королев¹, Р.А. Валеев¹, В.П. Пискорский¹, Р.Б. Моргунов¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Рассмотрены различные аспекты применения сплавов RE–TM–B для разработки систем магнитокалорического охлаждения. Приведен термодинамический анализ вариаций температуры, магнитной части энтропии, внутренней энергии и механической работы, совершаемой в цикле Карно. Дан анализ таким факторам, как предельная частота циклов, теплопроводность и теплоемкость рабочего тела, плотность частиц со спином. Обсуждаются возможности создания гибридных магнитокалорических машин, в которых переход между пара- и ферромагнитными состояниями редкоземельных сплавов стимулируется внешними воздействиями: температурой, механическими напряжениями, лазерным и токовым перемагничиванием.

Ключевые слова: ферромагнетик, адиабатическое и изотермическое размагничивание, спины, обменное взаимодействие, теплообмен, энтропия

Для цитирования: Королев Д.В., Валеев Р.А., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Анализ применимости редкоземельных магнитов RE–TM–B и RE–TM для магнитокалорического охлаждения (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 4 (122). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-60-68.

Scientific article

ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF RARE EARTH MAGNETS RE–TM–B AND RE–TM FOR MAGNETOCALORIC COOLING (review)

D.V. Korolev¹, R.A. Valeev¹, V.P. Piskorsky¹, R.B. Morgunov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. Various aspects of the use of RE–TM–B alloys for the development of magnetocaloric cooling systems are considered. Thermodynamic analysis of temperature variations, magnetic part of entropy, internal energy and mechanical work performed in the Carnot cycle is given. The analysis of such factors as the limiting frequency of cycles, thermal conductivity and heat capacity of the working fluid, the density of particles with spin is given. The possibilities of creating hybrid magnetocaloric machines in which the transition between the para- and ferromagnetic states of rare-earth alloys are stimulated by external influences: temperature, mechanical stresses, laser and current remagnetization are discussed.

Keywords: ferromagnet, adiabatic and isothermal demagnetization, spins, exchange interaction, heat transfer, entropy

For citation: Korolev D.V., Valeev R.A., Piskorsky V.P., Morgunov R.B. Analysis of the applicability of rare earth magnets RE–TM–B and RE–TM for magnetocaloric cooling (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 4 (122), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-4-60-68.

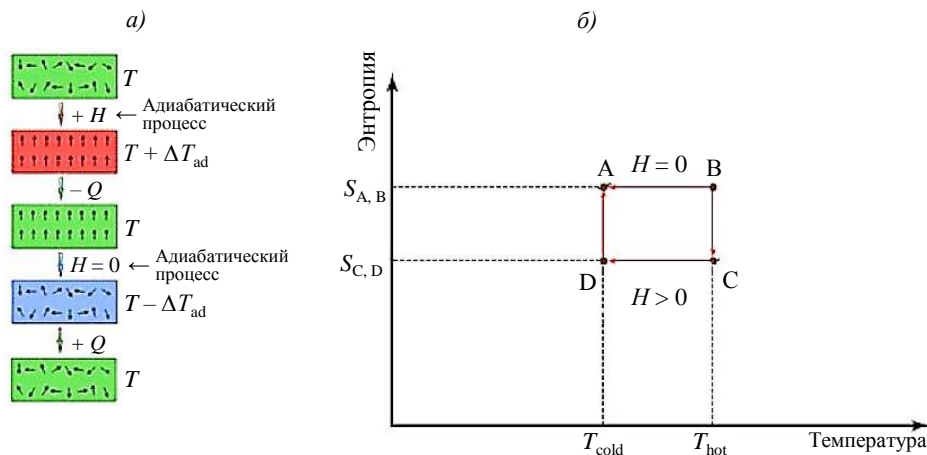
Введение. Физические принципы магнитного охлаждения

В настоящее время почти все холодильные машины, охлаждающие от комнатной температуры, основаны на парокомпрессионном цикле. Хотя в течение почти столетия компоненты охлаждающих машин были значительно оптимизированы, предел улучшения этой техники практически достигнут. Необходимо отметить, что фреон и другие хлорфторуглероды, используемые в качестве хладагентов, в конечном итоге попадают в окружающую среду, способствуя разрушению озонового слоя, глобальному потеплению и отравлению человечества и природы. Изменения климата в результате воздействия таких веществ носят накопительный характер и могут привести в недалеком будущем к климатической катастрофе. Замена механического процесса (сжатие и расширение пара) на манипуляции с электронными спинами (намагничивание и размагничивание твердого тела) увеличивает эффективность магнитного охлаждения с одновременным решением проблем экологии.

Магнитокалорический эффект известен более 100 лет [1], обзор этого эффекта дан в работе [2]. Впервые он был обнаружен как небольшое изменение температуры ферро- и парамагнетиков при внесении или удалении из магнитного поля [1]. В 1970-х гг. ему нашлось практическое применение [3]. Парамагнитные соли с атомами металлов с высоким значением спина охлаждали в магнитном поле до минимально возможной температуры и резко (адиабатически) выключали магнитное поле. При этом упорядоченные магнитным полем спины приходили в термическое равновесие с кристаллической решеткой, их энтропия увеличивалась за счет уменьшения фононной энтропии кристаллической решетки. Поскольку в адиабатическом процессе полное изменение (обозначено Δ) энтропии равно нулю, приращение магнитной части ΔS_m компенсируется изменением фононной части ΔS_{ph} , так что $\Delta S = \Delta S_m + \Delta S_{ph} = 0$. Изменение энтропии ведет к понижению температуры тела в условиях, когда теплообмен (δQ) с окружающей средой отсутствует $\delta Q = \Delta S_{ph}T + S_{ph}\Delta T = 0$. Этот факт был использован для снижения температуры до весьма низких температур – менее 1 К. При таких температурах предельное значение изменения энтропии $\Delta S_m = R \cdot \ln 2$ (где R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31446 Дж/(К·моль)) в расчете на моль вещества рабочего тела соответствует тепловой энергии $\delta Q = RT \cdot \ln 2$, которая оказывается сопоставимой с тепловой энергией фононных колебаний решетки. Использование парамагнитных солей при высоких температурах оказывается неэффективным, потому что приемлемые лабораторные магнитные поля с индукцией $B \approx 1$ Тл очень слабо ориентируют спины, так что зеэмановская энергия спинов, равная $\mu_B B$ в магнитном поле с индукцией B , в сотни раз меньше тепловой энергии частицы kT (где $\mu_B = 9,2741 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл – магнетон Бора). Поэтому изменение статистической значимости макросостояния при снятии поля стремится к единице, превращая приращение магнитной части энтропии в ноль – $\Delta S_m = RT \cdot \ln 1 = 0$. Таким образом, «энтропийный холодильник» оказался невозможным в качестве бытового прибора, работающего при температуре 300 К.

Взамен парамагнитных солей можно использовать ферромагнитные редкоземельные чистые металлы и сплавы системы RE–TM (RE – редкоземельный металл, TM – переходный металл) с температурой Кюри (T_C) вблизи комнатной температуры. Такие сплавы в магнитном поле позволяют адиабатически изменять температуру на разницу (ΔT), равную 20 К, в чистом гадолинии и на $\Delta T = 30$ К в его сплавах GdSiGe [4–6]. В настоящее время рекордсменом среди рабочих тел для магнитокалорического эффекта является сплав ReFe [7–9]. Такой эффект наблюдали также на металлическом диспрозии [10]. Сплавы системы RE–TM появились в результате многочисленных попыток химического дизайна и систематического изменения основных параметров ферромагнетика, таких как намагниченность насыщения, коэрцитивная сила, плотность спинов, теплопроводность и теплоемкость [11–13].

Идея использования ферромагнитных сплавов вблизи их температуры Кюри позволяет помимо энтропийного вклада в энергию Гиббса (как в парамагнитных солях) использовать преобразование обменной энергии, обеспечивающей спонтанное намагничивание. Холодильная машина на основе ферромагнетика отличается от машины с парамагнитными солями в качестве рабочего тела так же, как машина с испарением жидкости в охладительном цикле отличается от холодильного устройства, основанного на идеальном газе. Поглощение энергии на испарение жидкости для разрыва межмолекулярных связей, аналогично поглощению энергии ферромагнетиком при его преобразовании в парамагнетик с разрывом обменных связей между спинами. Можно сказать, что речь идет о замене легко испаряющейся жидкости на спиновую жидкость, превращение которой в парамагнетик требует поглощения энергии, равной энергии обменного взаимодействия. При этом вклад конфигурационной энтропии спинов довольно мал по сравнению с типичной энергией обменного взаимодействия в расчете на пару частиц. В этом цикле используется зависимость температуры Кюри от магнитного поля. Обычно температура T_C увеличивается с ростом поля, поэтому цикл Карно магнитного охлаждения с участием ферромагнетика можно представить в виде следующих стадий (см. рисунок).



Схематическое изображение ориентаций спинов (а) и зависимость энтропии от температуры в магнитном цикле Карно (б)

Стадия А–В при совершении небольшой отрицательной работы $A < 0$ внешними силами по адиабатическому ($dS = 0$) внесению «холодного» ферромагнетика в магнитное поле, которое сопровождается уменьшением температуры T_C и переходом в ферромагнитное состояние. Энергия обменного взаимодействия при этом снижается $dU < 0$, а ферромагнетик нагревается, поскольку изменение фононной энтропии нарастает за счет убывания спиновой энтропии $-dS = dS_{ph} + dS_m$.

Стадия В–С – изотермическая ($dT = 0$), на которой происходит теплообмен между рабочим телом и охлаждаемой средой, а температура ферромагнетика снижается. Количество полученного ферромагнетиком тепла отрицательное $\delta Q < 0$.

На стадии С–D происходит адиабатическое извлечение ферромагнетика из магнитного поля при отсутствии теплообмена – $\delta Q = 0$. Внешними силами совершается положительная работа $A > 0$, большая по модулю, чем на стадии АВ, так что общий баланс работы в цикле оказывается положительным. В замкнутом цикле затрачивается работа на охлаждение. Энергия обменного взаимодействия снижается, так как требуется энергия на разрыв обменного взаимодействия между спинами. При этом ферромагнетик охлаждается, поскольку изменение фононной энтропии уменьшается за счет роста спиновой энтропии при разупорядочении спинов $-dS = dS_{ph} + dS_m$.

На стадии D–A происходит изотермическое охлаждение рабочего тела до исходной температуры. Уменьшение поля вызывает размагничивание ферромагнетика, которое сопровождается поглощением тепла рабочим телом из окружающей среды $\delta Q > 0$. Это количество тепла, отнятое от охлаждаемой среды, оказывается большим, чем на стадии B–C, так что общий баланс отнятого тепла оказывается положительным. Окружающая среда охлаждается.

В этой схеме главной составляющей, контролирующей магнитное упорядочение спинов, является обменное взаимодействие между ними. Внешнее магнитное поле лишь немного сдвигает температуру T_C , изменяя условия спинового упорядочения. При этом зеемановская энергия внешнего поля оказывается значительно меньше энергии обменного взаимодействия. В расчете на один спин эта энергия составляет $\mu_B H \approx 10^{-4}$ эВ в магнитном поле $B = 1$ Тл, что значительно меньше средней тепловой энергии спина $kT \approx 10^{-2}$ эВ при температуре 300 К. Поэтому роль внешнего магнитного поля заключается не в передаче существенной энергии, а лишь в стимуляции «упорядочения–разупорядочения» спинов.

Вместо магнитного поля могут быть использованы любые другие «немагнитные» факторы, сдвигающие температуру T_C в нужном направлении на стадиях A–B и D–A. Например, в редкоземельных сплавах константы магнитоупругой анизотропии достаточно велики, поэтому механическое нагружение рабочего тела будет способствовать магнитному упорядочению в нем [14, 15].

Переход пара→ферромагнетик может быть достигнут также с помощью поляризованного лазерного излучения, которое передает момент импульса в спиновую систему парамагнетика, создавая спиновую поляризацию, достаточную для перехода в ферромагнитное состояние под действием обменной связи между атомами. Явление оптического перемагничивания хорошо известно и активно изучается в последнее время [16–18].

Пропускание спин-поляризованного тока также вызывает спиновую поляризацию ионов кристаллической решетки в результате обмена моментами электронов и ионов через спин-орбитальное взаимодействие [19, 20].

Как и в случае с поисками высокотемпературной сверхпроводимости возможно химического дизайна сплавов оказались к настоящему времени почти исчерпанными. Среди недостатков магнитокалорического эффекта, мешающих его широкому промышленному применению, так и остались необходимость сильных магнитных полей, требующих сверхпроводящего магнита; очень медленная регенерация ферромагнетика, ограничивающая частоту циклов 1–10 Гц; плохой теплообмен с окружающей средой, а также высокая стоимость наиболее эффективных сплавов. При этом возникают противоречивые требования к холодильной машине. С одной стороны, теплопроводность рабочего тела должна быть высокой для увеличения скорости обмена с охлаждаемым агентом. С другой – для реализации адиабатических стадий цикла нужно, чтобы продолжительность процесса теплопроводности не успевала приводить к передаче тепла за время внесения ферромагнетика в магнитное поле. Кроме того, соотношение теплопроводности и теплоемкости материала определяет глубину его охлаждения, так что желаемую низкую температуру необходимо подбирать регулировкой этих двух параметров.

Преимущества и недостатки магнитного охлаждения

Технология магнитного охлаждения имеет следующие преимущества:

- экологически чистая технология, при которой не производятся озоноразрушающие газы или выбросы парниковых газов;
- у ферромагнитных материалов более высокая плотность магнитной энтропии, чем у парамагнитных солей, и эта энтропия больше, чем в газовой среде;
- в магнитокалорическом охладителе используются электромагниты, сверхпроводящие или постоянные магниты, которые не создают высоких скоростей вращения, механических вибраций, шума, имеют длительный срок службы и стабильность;

– коэффициент полезного действия (КПД) магнитных холодильных систем может составлять 30–60 % цикла Карно, в отличие от 5–10 % для традиционных холодильных технологий. Например, в области поля $B = 5$ Тл магнитные холодильники могут генерировать мощность охлаждения до 600 Вт и эффективность цикла Карно 60 % при КПД ≈ 15 %. Однако в максимальном диапазоне температур 38 К охлаждающая способность снижается до ~ 100 Вт. В поле электромагнита $B = 1,5$ Тл магнитокалорические системы обеспечивают холодопроизводительность ~ 200 Вт;

– такая технология не требует сервисного обслуживания. Так, по данным компаний Gschneidner и Pecharsky, магнитный холодильник проработал соответственно >1500 ч и 18 мес без значительных ремонтов и поломок;

– магнитный холодильник имеет простую конструкцию, не требующую газопроводов и герметичности, он может работать при любом давлении ниже атмосферного в системах охлаждения и кондиционирования воздуха в автомобилях.

Основные недостатки данной технологии следующие:

– медленные процессы передачи тепла между рабочим ферромагнитным телом и охлаждаемой средой приводят к ограничению в частоте повторяемых циклов;

– поскольку магнитокалорические материалы состоят из редкоземельных элементов, их высокая цена является проблемой в индустрии магнитного охлаждения;

– отсутствуют материалы, которые при высокой эффективности в магнитокалорическом цикле имеют низкую намагниченность насыщения, а те из них, которые удовлетворяют этому условию, характеризуются значительной коэрцитивной силой, снижающей КПД устройства;

– постоянные магниты имеют сравнительно небольшие магнитные поля, тогда как электромагниты и сверхпроводящие магниты имеют потенциально более сильные магнитные поля, однако их стоимость и обслуживание дороги;

– диапазон температур в магнитокалорических системах ограничен, а многоступенчатые машины теряют производительность из-за потерь между стадиями;

– поскольку зазоры между магнитами и магнитокалорическим рабочим телом полностью определяют эффективность машины, механические воздействия и перемещение такой техники может приводить к поломке и расстройке механизма;

– использование редкоземельных материалов в производстве магнитных холодильников отрицательно влияет на окружающую среду.

Критерии эффективности магнитокалорических материалов и проблемы применения технологии магнитного охлаждения

В некоторых случаях возникают проблемы, которые ограничивают использование магнитного охлаждения и носят следующий характер:

– существует потребность в магнитных материалах, обладающих большим магнитокалорическим эффектом;

– требуется сильное магнитное поле;

– необходимы отличные характеристики регенерации и теплопередачи.

Максимальное изменение температуры, достигаемое в адиабатическом процессе, можно записать, согласно уравнению Максвелла, в виде

$$\Delta T = -\int (T/C(T, H))_H (\partial M(T, H)/\partial T)_H dH.$$

Согласно этому выражению, магнитокалорический эффект можно усилить следующим образом:

– уменьшить теплоемкость рабочего тела $C(T, H)$;

– использовать сильные магнитные поля;

– подобрать материал рабочего тела, в котором намагниченность наиболее резко меняется с температурой, так что производная $\partial M(T, H)/\partial T$ велика.

Перечислим следующие требования к магнетикам, используемым в магнито-охлаждающем устройстве:

– ферромагнетик не должен обладать гистерезисом, чтобы избежать потерь, расходуемых на нагрев (против охлаждения), в результате циклического прохождения петли гистерезиса;

– рабочее ферромагнитное тело должно обладать низкой теплоемкостью и высокой теплопроводностью;

– намагниченность насыщения рабочего тела должна быть достижимой для постоянных магнитов, создающих поле, в котором движется ферромагнетик;

– желателен использование «немагнитного» фактора, сдвигающего температуру Кюри в область более низких температур и влияющего на стимуляцию магнитного упорядочения, вызванного межспиновым обменным взаимодействием. Поэтому создаются гибридные магнитные холодильники, сочетающие обычный газо-паровой цикл охлаждения с магнитным циклом. К ряду таких устройств относятся, в частности, магнитные холодильники с охлаждающим элементом Пельтье;

– необходимо использовать переход пара→ферромагнетик вблизи точки Кюри, которая должна быть вблизи комнатной температуры;

– магниты, создающие поле, и магнит, используемый в качестве рабочего тела, должны быть как можно более стабильны и не менять своих свойств при большом количестве циклов «нагрев–охлаждение».

Критериями выбора магнитокалорического материала являются:

– высокая адиабатическая температура и большое изменение магнитной энтропии;

– высокая плотность магнитных моментов, а также ферромагнетики с высокой намагниченностью;

– низкая энтропия решетки (например, высокая температура Дебая), которая в адиабатическом цикле дает наибольшее понижение температуры;

– температура Кюри в диапазоне температур вблизи комнатной температуры (>250 К). Во всем температурном спектре цикла может быть достигнуто значительное изменение магнитной энтропии;

– почти нулевой магнитный гистерезис с регулировкой рабочих характеристик магнитного хладагента. Материалы с ограниченным тепловым гистерезисом используются для контроля способности магнитного хладагента с магнитокалорическим эффектом быть реверсивным;

– высокая теплопроводность и низкая удельная теплоемкость, которые необходимы для эффективного изменения температуры и быстрой теплопередачи;

– высокое электрическое сопротивление для подавления токов Фуко и электродинамических потерь;

– высокая химическая стабильность.

Перечисленные условия сложно соблюдать для одного и того же магнетика, поэтому в научно-технической литературе особое внимание уделяется подбору материала рабочего тела. Для этого создаются новые материалы путем вариации легирующих добавок, подбирается фазовый состав, создаются микро- и наномангнетики с требуемыми условиями фазового состава, допускающими существование фаз, которые неустойчивы в макроскопических твердых телах.

Заключения

Массовый тренд на разработку магнитокалорических устройств продолжается уже более 30 лет. За это время в промышленности так и не начали производить магнитные холодильники вследствие их высокой стоимости и малой эффективности. Очевидно, что эти устройства пока бесперспективны, хотя в США и Европе в научных журналах встречаются публикации об этой новой технологии охлаждения. Цель таких публикаций –

увеличение расходов и стимулирование непродуктивных затрат конкурирующей стороны на заведомо ненужные исследования.

Забота об экологии с точки зрения предотвращения выбросов углеводородов в атмосферу компенсируется экологически грязными технологиями обработки редкоземельных материалов, требуемых для создания магнитов.

Создание все более сложных гибридных машин, совмещающих газовой и магнитный циклы, почти не оставляет преимуществ для материалов с магнитокалорическим эффектом, но приводит к значительному усложнению контуров устройств и к снижению их надежности.

Производимые в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ редкоземельные сплавы – одни из лучших в мире [21–25]. Они имеют высокую коэрцитивную силу, демонстрируют значительные потери энергии, равные площади петли гистерезиса, в каждом цикле и могут применяться для создания постоянных магнитов, но не в качестве ферромагнитного рабочего тела.

Более эффективным направлением работ представляется развитие механокалорических машин на основе ферромагнетиков, а также других способов «немагнитного» переключения состояний ферромагнетика. Такие изобретения в большом количестве имеются в Российской Федерации.

Список источников

1. Warburg E. Magnetische Untersuchungen // Magnetische Untersuchungen. Annalen Der Physik. 1881. Vol. 249. No. 5. P. 141–164.
2. Андреев А.С., Белов К.П., Никитин С.А., Тишин А.М. Магнитокалорические эффекты в редкоземельных магнетиках // Успехи физических наук. 1989. Т. 158. Вып. 4. С. 553–579.
3. Brown G.V. Magnetic heat pumping near room temperature // Journal of Applied Physics. 1976. Vol. 47. No. 8. P. 3673–3680.
4. Fast R.W. Advances in Cryogenic Engineering // Proceedings of the 1989 Cryogenic Engineering Conference. 1990. Vol. 35. Part A. P. 517–599.
5. Zimm C., Jastrab A., Sternberg A. et al. Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator // Advances in Cryogenic Engineering. 1998. Vol. 43. P. 1759–1766.
6. Gschneidner K.A. (Jr.), Pecharsky V.K. Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects // International Journal of Refrigeration. 2008. Vol. 31. P. 945–961.
7. Tishin A.M., Spichkin Y.I. The Magnetocaloric Effect and its Applications. IOP Publishing Ltd., 2003. 463 p.
8. Dankov S.Y., Tishin A.M., Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium // Physical Review B. 1998. Vol. 57. No. 6. P. 3478–3490.
9. Gschneidner K.A., Pecharsky V.K., Gailloux M.J., Takeya H. Utilization of the Magnetic Entropy in Active Magnetic Regenerator Materials // Advances in Cryogenic Engineering. 1996. Vol. 42. P. 465–474.
10. Chernyshov A.S., Tsokol A.O., Tishin A.M. et al. Magnetic and magnetocaloric properties and the magnetic phase diagram of single-crystal dysprosium // Physical Review B. 2005. Vol. 71. No. 18. P. 184410-1-17.
11. Annaorazov M., Asatryan K., Myalikhgulyev G. et al. Alloys of the FeRh system as a new class of working material for magnetic refrigerators // Cryogenics. 1992. Vol. 32. No. 10. P. 867–872.
12. Guo Z.B., Du Y.W., Zhu J.S. et al. Large Magnetic Entropy Change in Perovskite-Type Manganese Oxides // Physical Review Letters. 1997. Vol. 78. No. 6. P. 1142–1145.
13. Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. (Jr.) Giant Magnetocaloric Effect in $Gd_5(Si_2Ge_2)$ // Physical Review Letters. 1997. Vol. 78. No. 23. P. 4494–4497.
14. Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from 20 to 290 K // Applied Physics Letters. 1997. Vol. 70. No. 24. P. 3299–3301.
15. Morellon L., Magen C., Algarabel P.A. et al. Magnetocaloric effect in $Tb_5(Si_xGe_{1-x})_4$ // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79. No. 9. P. 1318–1320.
16. Wada H., Tanabe Y. Giant magnetocaloric effect of $MnAs_{1-x}Sb_x$ // Applied Physics Letters. 2001. Vol. 79. No. 20. P. 3302–3304.

17. Fujita A., Fujieda S., Hasegawa Y., Fukamichi K. Itinerant-electron metamagnetic transition and large magnetocaloric effects in $\text{La}(\text{Fe}_x\text{Si}_{1-x})_{13}$ compounds and their hydrides // *Physics Review B*. 2003. Vol. 67. No. 10. P. 104416-1-12.
18. Tegus O., Brück E., Buschow K.H.J., de Boer F.R. Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications // *Nature*. 2002. Vol. 415. No. 10. P. 150–152.
19. Albertini F., Canepa F., Cirafici S. et al. Composition dependence of magnetic and magnetothermal properties of Ni–Mn–Ga shape memory alloys // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2004. P. 2111–2112.
20. Gschneidner K.A. (Jr.), Pecharsky V.K., Tsokol A.O. Recent developments in magnetocaloric materials // *Reports on Progress in Physics*. 2005. Vol. 68. No. 6. P. 1479–1539.
21. Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А., Бакрадзе М.М., Дворецкая Е.В., Коплак О.В., Моргунов Р.Б. Инженерия редкоземельных микромагнитов RE–TM–B (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 05. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 05.11.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
22. Коплак О.В., Куницына Е.И., Валеев Р.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Моргунов Р.Б. Ферромагнитные микропровода $\alpha\text{-Fe}/(\text{PrDy})(\text{FeCo})\text{B}$ для микроманипуляторов и полимерных композитов // *Труды ВИАМ*. 2019. № 11 (83). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-60-67.
23. Моргунов Р.Б., Коплак О.В., Таланцев А.Д., Королев Д.В., Пискорский В.П., Валеев Р.А. Феноменология петель магнитного гистерезиса в многослойных микропроводах $\alpha\text{-Fe}/\text{DyPrFeCoB}$ // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-67-75.
24. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
25. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Королев Д.В., Моргунов Р.Б., Резчикова И.И. Влияние легирования тербием и гадолинием на термостабильность и магнитные свойства спеченных материалов Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B // *Труды ВИАМ*. 2019. № 7 (79). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.11.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.

References

1. Warburg E. Magnetische Untersuchungen. *Magnetische Untersuchungen. Annalen Der Physik*, 1881, vol. 249, no. 5, pp. 141–164.
2. Andreenko A.S., Belov K.P., Nikitin S.A., Tishin A.M. Magnetocaloric effects in rare earth magnets. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1989, vol. 158, is. 4, pp. 553–579.
3. Brown G.V. Magnetic heat pumping near room temperature. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, no. 8, pp. 3673–3680.
4. Fast R.W. Advances in Cryogenic Engineering. *Proceedings of the 1989 Cryogenic Engineering Conference*, 1990, vol. 35, part A, pp. 517–599.
5. Zimm C., Jastrab A., Sternberg A. et al. Description and Performance of a Near-Room Temperature Magnetic Refrigerator. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1998, vol. 43, pp. 1759–1766.
6. Gschneidner K.A. (Jr.), Pecharsky V.K. Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects. *International Journal of Refrigeration*, 2008, vol. 31, pp. 945–961.
7. Tishin A.M., Spichkin Y.I. *The Magnetocaloric Effect and its Applications*. IOP Publishing Ltd., 2003, 463 p.
8. Dankov S.Y., Tishin A.M., Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. Magnetic phase transitions and the magnetothermal properties of gadolinium. *Physical Review B*, 1998, vol. 57, no. 6, pp. 3478–3490.
9. Gschneidner K.A., Pecharsky V.K., Gailloux M.J., Takeya H. Utilization of the Magnetic Entropy in Active Magnetic Regenerator Materials. *Advances in Cryogenic Engineering*, 1996, vol. 42, pp. 465–474.
10. Chernyshov A.S., Tsokol A.O., Tishin A.M. et al. Magnetic and magnetocaloric properties and the magnetic phase diagram of single-crystal dysprosium. *Physical Review B*, 2005, vol. 71, no. 18, pp. 184410-1-17.
11. Annaorazov M., Asatryan K., Myalikgulyev G. et al. Alloys of the FeRh system as a new class of working material for magnetic refrigerators. *Cryogenics*, 1992, vol. 32, no. 10, pp. 867–872.
12. Guo Z.B., Du Y.W., Zhu J.S. et al. Large Magnetic Entropy Change in Perovskite-Type Manganese Oxides. *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, no. 6, pp. 1142–1145.

13. Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. (Jr.) Giant Magnetocaloric Effect in $Gd_5(Si_2Ge_2)$. *Physical Review Letters*, 1997, vol. 78, no. 23, pp. 4494–4497.
14. Pecharsky V.K., Gschneidner K.A. Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from 20 to 290 K. *Applied Physics Letters*, 1997, vol. 70, no. 24, pp. 3299–3301.
15. Morellon L., Magen C., Algarabel P.A. et al. Magnetocaloric effect in $Tb_5(Si_xGe_{1-x})_4$. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, no. 9, pp. 1318–1320.
16. Wada H., Tanabe Y. Giant magnetocaloric effect of $MnAs_{1-x}Sb_x$. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, no. 20, pp. 3302–3304.
17. Fujita A., Fujieda S., Hasegawa Y., Fukamichi K. Itinerant-electron metamagnetic transition and large magnetocaloric effects in $La(Fe_xSi_{1-x})_{13}$ compounds and their hydrides. *Physics Review B*, 2003, vol. 67, no. 10, pp. 104416-1-12.
18. Tegus O., Brück E., Buschow K.H.J., de Boer F.R. Transition-metal-based magnetic refrigerants for room-temperature applications. *Nature*, 2002, vol. 415, no. 10, pp. 150–152.
19. Albertini F., Canepa F., Cirafici S. et al. Composition dependence of magnetic and magnetothermal properties of Ni–Mn–Ga shape memory alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2004, pp. 2111–2112.
20. Gschneidner K.A. (Jr.), Pecharsky V.K., Tsokol A.O. Recent developments in magnetocaloric materials. *Reports on Progress in Physics*, 2005, vol. 68, no. 6, pp. 1479–1539.
21. Korolev D.V., Piskorskii V.P., Valeev R.A., Bakradze M.M., Dvoretzkaya E.V., Koplak O.V., Morgunov R.B. Rare-earth RE–TM–B micromagnets engineering (review). *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 05. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: November 05, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-44-60.
22. Koplak O.V., Kunitsyna E.I., Valeev R.A., Korolev D.V., Piskorskii V.P., Morgunov R.B. Ferromagnetic microwires α -Fe/(PrDy)(FeCo)B for micromanipulators and polymer composites. *Trudy VIAM*, 2019, no. 11 (83), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-11-60-67.
23. Morgunov R.B., Koplak O.V., Talantsev A.D., Korolev D.V., Piskorskij V.P., Valeev R.A. The phenomenology of the magnetic hysteresis loops in multilayer microwires α -Fe/DyPrFeCoB. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 05, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-67-75.
24. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
25. Piskorsky V.P., Valeev R.A., Korolev D.V., Morgunov R.B., Rezhikova I.I. Terbium and gadolinium dopin g influence on thermal stability and magnetic properties of sintered magnets Pr–Tb–Gd–Fe–Co–B. *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: November 06, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-59-66.

Информация об авторах

Королев Дмитрий Викторович, старший научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Валеев Руслан Анверович, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Пискорский Вадим Петрович, заместитель начальника лаборатории по науке, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Моргунов Роман Борисович, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Dmitry V. Korolev, Senior Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Ruslan A. Valeev, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vadim P. Piskorsky, Deputy Head of Laboratory of Science, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Roman B. Morgunov, Leading Researcher, Doctor of Sciences (Phys. & Math.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 09.01.2023.

The article was submitted 21.12.2022; approved and accepted for publication after reviewing 09.01.2023.