

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.638.5

СОВРЕМЕННЫЕ МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ: СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2023 г. В. В. Соколовский^а, М. А. Загребин^а, В. Д. Бучельников^а, В. В. Марченков^{б, в, *}

^аЧелябинский государственный университет, ул. Братьев Кашириных, 129, Челябинск, 454001 Россия

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

^вУральский федеральный университет, ул. Мира 19, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: march@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 23.08.2023 г.

После доработки 23.08.2023 г.

Принята к публикации 25.08.2023 г.

Представлен краткий обзор работ, связанных с новым и перспективным направлением — технологией магнитного охлаждения, в основе которой лежит магнитокалорический эффект (МКЭ). Кратко рассмотрена суть эффекта и основные публикации, относящиеся к этой области. Сообщается о материалах, в которых наблюдается МКЭ, и представлены соответствующие диаграммы основных публикаций по МКЭ за последние 5 лет. Приведены последние результаты исследований российских ученых, работающих в данной области.

Ключевые слова: технология магнитного охлаждения, магнитокалорический эффект, магнитные и магнитотепловые свойства, фазовые переходы

DOI: 10.31857/S0015323023601629, **EDN:** HIMEEV

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы рост потребления электроэнергии вследствие активного использования искусственного охлаждения в быту и в различных отраслях промышленности (таких как нефтяная, газовая, химическая промышленность) становится все более актуальной проблемой [1–3]. С начала развития технологий охлаждения, холодильное оборудование, работающее при температурах, близких к комнатным, реализовано на термодинамических циклах испарения—конденсации и сжатия—разрежения рабочего тела — пара, переходящего на определенных стадиях цикла в жидкость. Активные исследования и разработки, проводимые научными и промышленными группами, позволили значительно усовершенствовать составные компоненты холодильной техники (компрессоры, хладагенты, теплообменники и др.) и повысить ее эффективность [1–3]. Однако на дальнейшее использование такой техники накладываются определенные ограничения, связанные с достижением фундаментального предела их энергоэффективности, а также с использованием в них опасных химических веществ в качестве хладагентов, таких как хлорфторуглероды, сжиженный аммиак, гидрофторуглероды и др., обладающих наиболее разрушительным воздействием на озоновый слой [4].

В настоящее время перспективной альтернативой парогазовой технологии выступает технология магнитного охлаждения [5–22], которая уже более 80 лет применяется для получения сверхнизких температур. Очевидные преимущества магнитного охлаждения заключаются в снижении энергопотребления, отсутствии компрессора и озоноразрушающих газов, использовании твердотельного рабочего тела. Это приводит к значительному повышению энергоэффективности, компактности, бесшумности и практически отсутствию механических колебаний.

В основе технологии магнитного охлаждения лежит магнитокалорический эффект (МКЭ), т.е. изменение температуры теплоизолированного магнитного тела при изменении величины внешнего магнитного поля (адиабатический режим), либо поглощение или выделение тепла телом при изменении внешнего магнитного поля, если магнитное тело находится в контакте с термостатом (изотермический режим) [7]. Для численной оценки МКЭ используют две магнитокалорические характеристики: адиабатическое изменение температуры (ΔT_{ad}) и изотермическое изменение энтропии (ΔS), определяемые следующим образом:

$$\Delta T_{ad}(T, \Delta H) = [T_H(S) - T_0(S)]_S;$$

$$\Delta S(T, \Delta H) = [S_H(T) - S_0(T)]_T,$$

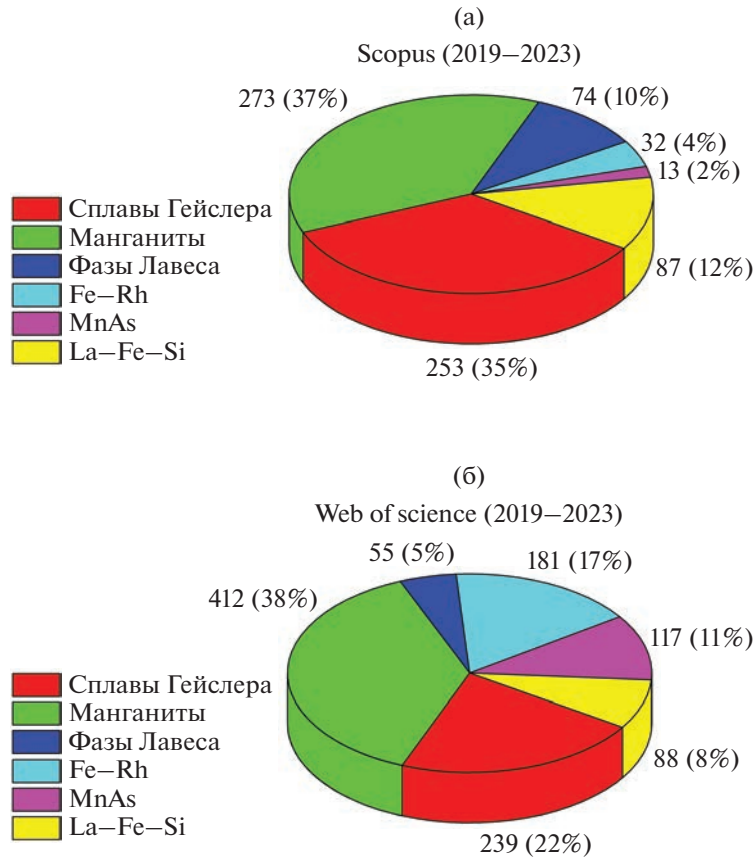


Рис. 1. Диаграммы количества публикаций по МКЭ с 2019 г. По данным Scopus (а) и Web of Science (б).

где T_H , S_H и T_0 , S_0 – температура и энтропия материала в магнитном поле и в его отсутствие соответственно.

Наибольшие значения ΔT_{ad} и ΔS наблюдаются в окрестностях магнитного фазового перехода, приводящего к изменению спиновой подсистемы, взаимосвязанной со структурным состоянием. Поэтому МКЭ существенно зависит от вида фазового перехода.

При фазовом переходе первого рода возникают большие изменения ΔT_{ad} и ΔS , но в узком температурном интервале δT ; потери на гистерезис, приводящие к рассеянию энергии в виде тепла и необратимости МКЭ; деградация МКЭ и старение материала при циклическом воздействии магнитного поля из-за структурных модификаций. К таким материалам относятся сплавы на основе Fe–Rh, La–Fe–Si(Al) и их гидраты, фазы Лавеса, R–Si–Ge (R – редкоземельный элемент), Mn–As, Mn–Fe–P–As, сплавы Гейслера Ni–(Y)–Mn–Z (Y = Fe, Cu, Co и Z = Ga, In, Sb, Sn) и др. (см. [4–22] и рис. 1).

При фазовом переходе второго рода наблюдаются следующие особенности: небольшие изменения ΔT_{ad} и ΔS , однако в более широком диапазо-

не температур δT ; отсутствует гистерезис, медленная кинетика, необратимость МКЭ и структурных модификаций. Примеры таких материалов: Gd, интерметаллиды на основе редкоземельных металлов, манганиты, сплавы Гейслера, высокоэнтропийные сплавы, Mn-содержащие сплавы $MnTX$ ($T = Ni, Co; X = Ge, Ga$) и др. (см. [4–22] и рис. 1).

На рис. 1 представлены диаграммы числа публикаций по МКЭ в разных материалах за последние 5 лет (с 2019 г.) по данным Scopus и Web of Science. Видно, что наибольшее количество публикаций приходится на манганиты и сплавы Гейслера. Далее идут системы на основе Fe–Rh и La–Fe–Si, фазы Лавеса и соединения MnAs.

Несмотря на значительное разнообразие магнитокалорических материалов, существуют открытые вопросы, сдерживающие продвижение технологии магнитного охлаждения. Большинство материалов, проявляющих хорошие магнитокалорические свойства, содержат дорогие, редкие, ядовитые или токсичные элементы. Очевидно, что для полноценного использования в промышленности такие материалы должны состоять из недорогих, широко распространенных в природе и безопасных элементов [17].

Следующий сдерживающий фактор – это нарушение циклического магнитокалорического отклика и эффективности холодильного цикла для материалов с фазовым переходом первого рода в силу наличия тепловых и магнитных гистерезисов. Циклическое воздействие магнитного поля на образец приводит к необратимому уменьшению значения ΔT_{ad} на этапе первого цикла намагничивания из-за выделения скрытой теплоты перехода (“эффект первого измерения”) [13, 23]. Пренебрежение этим эффектом приводит к завышенной оценке МКЭ.

Следует также отметить, что точное измерение ΔT_{ad} материалов, особенно в сильных импульсных и переменных магнитных полях, представляется большой проблемой в магнитокалорических исследованиях в результате влияния электромагнитных помех на показания датчиков и относительно длительного времени отклика из-за тепловой инерции. Разработка бесконтактных оптических методов измерения МКЭ позволяет избежать определенного рода погрешностей, возникающих при измерении контактными термодатчиками.

Еще одним открытым вопросом является то, что материалы, в которых происходит фазовый переход первого рода, проявляют механическую нестабильность, хрупкость и склонность к разрушению после многочисленного термоциклирования из-за сопутствующего изменения объема в процессе перехода, что снижает их пригодность в качестве рабочего тела. В то же время материалы могут проявлять фазовую нестабильность из-за кластеризации, расслоения и сегрегации на нежелательные вторичные фазы, что ставит под угрозу оценку характеристик чистых фаз [13, 16].

Для решения отмеченных проблем к сплавам могут быть применены различные методы термомеханической обработки (прокатка, пластическая деформация кручением и всесторонняя изотермическая ковка и др.). Помимо этого, приложение внешнего давления может изменить температуру и ширину фазового перехода, а также вызвать усиление магнитокалорических свойств.

Немаловажную роль в исследовании магнитокалорических материалов играет теоретический аппарат. В последние годы наблюдается рост первопринципных вычислений и разработка моделей в рамках феноменологического и статистического подходов [21]. Их комбинация приобретает решающее значение и повышает предсказательную силу теоретических исследований, направленных на поиск оптимальных композиционных составов с наибольшим МКЭ, построение фазовых диаграмм, оценку фазовой стабильности материалов по отношению к процессам сегрегации, а также на выявление роли магнитной, структурной и электронной подсистемы в формировании МКЭ.

В настоящем выпуске журнала представлены работы ведущих научных групп из РФ, занимающихся разработкой новых и синтезом перспективных магнитокалорических материалов, экспериментальным и теоретическим исследованием их структуры и физических свойств, разработкой новых методик измерения их характеристик, прежде всего магнитокалорических свойств.

МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе [24] представлен обзор современных бесконтактных оптических методов измерения МКЭ на примере таких известных магнитокалорических материалов, как Gd, сплав $\text{Fe}_{49}\text{Rh}_{51}$, композиты на основе MnAs и $\text{LaFe}_{11.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Si}_{1.3}\text{H}_{1.6}$ и др. Показано, что использование оптических методов дает высокую точность измерения МКЭ одновременно с высоким быстродействием, что очень важно в экспериментах в сильных постоянных и импульсных магнитных полях.

В работе [25] сообщается о синтезе композитов на основе сплава $\text{LaFe}_{11.4}\text{Mn}_{0.3}\text{Si}_{1.3}\text{H}_{1.6}$ и изучении их магнитокалорических свойств. Показано, что максимум адиабатического изменения температуры в чистом порошке сплава $\Delta T_{ad} = 3$ К при температуре $T_0 = 287$ К в режиме охлаждения. Для композитов максимальные значения МКЭ примерно в 2 раза ниже, чем в исходном сплаве. Однако за счет создания композитной структуры можно изменить температуру Кюри, а, следовательно, направленно смещать температуру, при которой наблюдается максимум МКЭ.

Автор работы [26] сообщает о возможном развитии обобщенной теории Ландау для фазовых переходов первого рода и предлагает простую модель, с помощью которой можно попытаться объяснить МКЭ. Общая идея работы состоит в том, чтобы провести объяснение поведения МКЭ в области переходов первого рода за счет фазового расслоения.

При адиабатическом размагничивании магнетиков в области температуры Кюри требуется отвод или подвод тепла, который при криогенных температурах осуществляется при помощи газовых и механических тепловых ключей. В случае механического теплового ключа возникает задача поиска новых криогенных механически стойких термоинтерфейсов. В работе [27] изучали контактное термическое сопротивление разъемного соединения в виде медной контактной пары с термоинтерфейсом из слоев графена. Методом нестационарного теплового потока определены значения контактного термического сопротивления разъемной контактной пары медь–графен–медь в диапазоне температур 15–150 К в магнит-

ном поле до 10 Тл. Полученные результаты могут быть использованы при создании криогенных магнитных рефрижераторов для сжижения различных газов.

Используя теорию функционала плотности и метод Монте-Карло, авторы [28] исследовали структурные, магнитные и термодинамические свойства сплавов Mn_2YSn ($Y = Sc, Ti$ и V) в зависимости от приложенного давления. Установлено, что для каждого из изученных соединений существуют два магнитных состояния с низким и высоким магнитным моментом при меньшем и большем объеме элементарной ячейки, которые разделены энергетическим барьером. Величина барьера зависит от приложенного внешнего давления. Две фазы становятся практически равными по энергии при определенном критическом давлении. Показано, что учет давления приводит к пониманию механизма повышения МКЭ в фазе с высоким магнитным моментом.

С помощью первопринципных методов в [29] изучали магнитные свойства и электронную структуру сплавов $FeRhSn_{1-x}Z_x$ ($x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$; $Z = Ge, Si, Sb$). Показано, что для всех сплавов энергетически выгодной является γ -фаза, за исключением сплава $FeRhSi$, для которого равновесной является β -фаза. Установлено, что добавление четвертого элемента в трехкомпонентный сплав позволяет смещать уровень Ферми и получать новые четырехкомпонентные сплавы со стопроцентной спиновой поляризацией. Показано, что большинство исследованных сплавов являются полуметаллическими ферромагнетиками.

В рамках теории функционала плотности в работе [30] исследовано влияние легирования Cu и Zn на магнитные и структурные свойства кубической и тетрагональной фазы сплава Гейслера $Ni_2Mn_{1.125}Ga_{0.875}$. Частичное замещение атомов Ga атомами Cu и Zn приводит к уменьшению разницы энергий между ферромагнитным и ферримагнитным состоянием кубической фазы и увеличению энергетического барьера между кубической и тетрагональной фазой, что косвенно указывает на рост температуры структурного перехода, наблюдаемого экспериментально. Показано, что температура Кюри тетрагональной фазы существенно уменьшается по сравнению с температурой Кюри кубической фазы с ростом содержания Cu и Zn за счет увеличения межподрешеточного антиферромагнитного взаимодействия между атомами Mn .

Авторы [31] изучали влияние всесторонней изотермическойковки на микроструктуру и мартенситное превращение в магнитокалорическом сплаве $Ni_{58}Mn_{18}Ga_{24}$. Продемонстрировано, что деформация ковкой приводит к трансформации исходной равноосной зеренной структуры. Анализ анизотропии термического расширения в об-

ласти мартенситного превращения показал, что наблюдается только ангармоническое изменение длины образца, что свидетельствует о низком уровне плотности дефектов и внутренних напряжений в сплаве $Ni_{58}Mn_{18}Ga_{24}$.

В работе [32] выполнены экспериментальные исследования магнитных и магнитокалорических свойств поликристаллических сплавов RCo_5 ($R = Gd, Tb, Dy, Ho$) в магнитном поле до 3 Тл. Установлено, что эти соединения обладают малой коэрцитивной силой, а их намагниченность выходит на насыщение уже в слабых полях. Показано, что магнитокалорический эффект в исследованных соединениях наблюдается в широком температурном диапазоне, а для интерметаллидов $TbCo_5, DyCo_5, HoCo_5$ имеется несколько областей существования МКЭ, сравнимых по величине эффекта. Наличие нескольких интервалов существования МКЭ обуславливается сложной картиной магнитных фазовых переходов в этих ферримагнитных соединениях.

В работе [33] проведено сравнительное исследование магнитокалорических характеристик редкоземельных магнетиков, содержащих водород $Gd-H, (Gd,R)Ni-H$ (R – редкоземельный металл), RCo_2-H со структурой фаз Лавеса, систем без водорода с общей формулой RTX ($T = Mn, Fe, Co; X = Si$), а также соединений типа $R_2(Fe,Al)_{17}$, которые имеют точку магнитной компенсации и демонстрируют знакопеременный МКЭ. Установлены основные закономерности поведения и выявлены специфические особенности формирования магнитокалорических свойств исследованных материалов в зависимости от их состава и структуры.

Авторы [34] изучали изобарические температурные зависимости намагниченности и магнитокалорические характеристики сплавов системы $Mn_{1-x}Cr_xNiGe$ в постоянном магнитном поле до 10 кЭ в диапазоне гидростатических давлений до 12 кбар. Было показано, что в исследуемых сплавах реализуется гелимагнитное упорядочение, которое с ростом давления претерпевает качественные изменения от плавных безгистерезисных переходов 2-го рода до переходов 1-го рода, сопровождающихся появлением температурного гистерезиса и возрастанием МКЭ. На основе обменно-структурной модели представлено объяснение механизма барической трансформации магнитных и магнитокалорических свойств сплавов $Mn_{1-x}Cr_xNiGe$.

В работе [35] изучали фазовую стабильность и устойчивость к сегрегации аустенитной и мартенситной фаз сплавов Гейслера $Ni_{2-x}Co_xMn_{1+y}Z_{1-y}$ ($x = 0, 0.25, 0.5$ и $y = 0, 0.25, 0.5, 0.75$; $Z = Ga, In, Sb, Sn$) с различным типом магнитного упорядочения с помощью первопринципных расчетов.

Показано, что стабильность демонстрируют только сплавы $\text{Ni}_{1.5}\text{Co}_{0.5}\text{MnGa}$ и Ni_2MnGa в кубической и тетрагональной структурах с ферромагнитным упорядочением, соответственно, а также Ni_2Mn_2 в тетрагональной структуре с шахматным и послойным антиферромагнитным упорядочением. Для данных составов показано наличие нулевой энергии выпуклой оболочки и отсутствие реакций с положительной энергией декомпозиции. Остальные соединения представляются метастабильными как из-за наличия устойчивых реакций с отрицательной энергией декомпозиции, так и вследствие реакций распада с положительной энергией декомпозиции. Число реакций распада возрастает с ростом химического беспорядка, т.е. отклонения от стехиометрии.

Авторы [36] экспериментально исследовали МКЭ, тепловое расширение и магнитострикцию в сплавах $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As}$ ($x = 0.003, 0.006$) в магнитных полях до 8 Тл. Обнаружено, что с ростом концентрации железа происходит смещение температур максимума МКЭ и магнитострикции, а также минимума на температурной зависимости теплового расширения, в сторону низких температур. При этом значения всех измеренных характеристик уменьшаются. Авторы заключают, что легирование Fe может приводить к структурным деформациям в сплавах $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As}$, что в свою очередь вызывает обнаруженные изменения в исследуемых свойствах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, магнитное охлаждение является активной областью экспериментальных и теоретических исследований. Актуальны поиски новых магнитокалорических материалов, разработка методик исследований магнитных и магнитокалорических свойств, увеличение точности измерений температуры материалов, создание адиабатических условий, а также разработка теоретических подходов к описанию магнитокалорического эффекта.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственных заданий FUMM-2022-0003 (тема “Спин” Г.р. № 122021000036-3) и FEGG-2020-0012 (075-01493-23-00 Г.р. № 120070890015-5). Один из авторов (В.В.М.) благодарит Уральский федеральный университет за поддержку (программа “Приоритет-2030”).

Нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tassou S., Ge Y.* 20 – Reduction of refrigeration energy consumption and environmental impacts in food retailing // Handbook of Water and Energy Management in Food Processing. 2008. P. 585–611.

2. *Isaac M., Van Vuuren D.P.* Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change // Energy Policy. 2009. V. 37. P. 507–521.
3. *Tassou S.A., Lewis J.S., Ge Y.T., Hadaway A., Chaer I.* A review of emerging technologies for food refrigeration applications // Appl. Therm. Eng. 2010. V. 30. P. 263–276.
4. *Smith C.B., Parmenter K.E.* Energy analysis / Energy Management Principles. 2nd ed., edited by C.B. Smith, K.E. Parmenter. Oxford: Elsevier, 2016. P. 95–123.
5. *Pecharsky V.K., Gschneidner Jr. K.A.* Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from 20 to 290 K // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70. № 24. P. 3299–3301.
6. *Yu B.F., Gao Q., Zhang B., Meng X.Z., Chen Z.* Review on research of room temperature magnetic refrigeration // Int. J. Refrig. 2003. V. 26. № 6. P. 622–636.
7. *Tishin A.M., Spichkin Y.I.* The magnetocaloric effect and its applications. Series in Condensed Matter Physics // IOP Publishing: Bristol and Philadelphia, 2003.
8. *Gschneidner Jr. K.A., Pecharsky V.K., Tsokol A.O.* Recent developments in magnetocaloric materials // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. № 6. P. 1479–1539.
9. *Gschneidner Jr. K.A., Pecharsky V.K.* Thirty years of near room temperature magnetic cooling: Where we are today and future prospects // Int. J. Refrig. 2008. V. 31. № 6. P. 945–961.
10. *Gutfleisch O., Willard M.A., Brück E., Chen C.H., Sankar S., Liu J.P.* Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient // Advanced Mater. 2011. V. 23. P. 821–842.
11. *Buchelnikov V.D., Sokolovskiy V.V.* Magnetocaloric effect in Ni–Mn–X (X = Ga, In, Sn, Sb) Heusler alloys // Phys. Met. Metal. 2011. V. 112. № 7. P. 633–665.
12. *Sandeman K.G.* Magnetocaloric materials: The search for new systems // Scr. Mater. 2012. V. 67. № 6. P. 566–571.
13. *Gutfleisch O., Gottschall T., Fries M., Benke D., Radulov I., Skokov K.P., Wende H., Gruner M., Acet M., Entel P., Farle M.* Mastering hysteresis in magnetocaloric materials // Philos. Trans. Royal Soc. A: Math. Phys. Eng. 2016. V. 374. № 2074. P. 20150308–21.
14. *Lyubina J.* Magnetocaloric materials for energy efficient cooling // J. Phys. D: Appl. Phys. 2017. V. 50. № 5. P. 053002.
15. *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.
16. *Scheibel F., Gottschall T., Taubel A., Fries M., Skokov K.P., Terwey A., Keune W., Ollefs K., Wende H., Farle M., Acet M., Gutfleisch O., Gruner M.E.* Hysteresis design of magnetocaloric materials – From basic mechanisms to applications // Energy Technol. 2018. V. 6. № 8. P. 1397–1428.
17. *Zarkevich N., Zverev V.I.* Viable materials with a giant magnetocaloric effect // Crystals. 2020. V. 10. P. 815.
18. *Kitanovski A.* Energy Applications of Magnetocaloric Materials // Adv. Energy Mater. 2020. V. 10. P. 1903741.

19. *Kitanovsky A.* Applications of Magnetocaloric Materials // *Encyclopedia of Smart Mater.* 2022. V. 5. P. 418.
20. *Khovaylo V.V., Taskaev S.V.* Magnetic Refrigeration: From Theory to Applications / *Encyclopedia of Smart Mater.* Oxford: Elsevier, 2022. P. 407–417.
21. *Соколовский В.В., Мирошкина О.Н., Бучельников В.Д.* Обзор современных теоретических методов исследования магнитокалорических материалов // *ФММ.* 2022. Т. 123. № 4. С. 344–402.
22. *Law J. Y., Moreno-Ramírez L. M., Díaz-García A., Franco V.* Current perspective in magnetocaloric materials research // *J. Appl. Phys.* 2023. V. 133. P. 040903.
23. *Khovaylo V.V., Skokov K.P., Koshkid'ko Yu.S., Koledov V.V., Shavrov V.G., Buchelnikov V.D., Taskaev S.V., Miki H., Takagi T., Vasiliev A.N.* Adiabatic temperature change at first-order magnetic phase transitions: $\text{Ni}_{2.19}\text{Mn}_{0.81}\text{Ga}$ as a case study // *Phys. Rev. B.* 2008. V. 78. P. 060403(R).
24. *Каманцев А.П., Амиров А.А., Юсупов Д.М., Бутвина Л.Н., Кошкидько Ю.С., Головчан А.В., Вальков В.И., Алиев А.М., Коледов В.В., Шавров В.Г.* Современные бесконтактные оптические методы измерения магнитокалорического эффекта // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1025–1043.
25. *Каманцев А.П., Амиров А.А., Юсупов Д.М., Головчан А.В., Ковалёв О.Е., Комлев А.С., Алиев А.М.* Магнитокалорический эффект в композитах на основе $\text{La}(\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Si})_{13}\text{H}$: эксперимент и теория // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1074–1085.
26. *Игошев П.А.* Магнитокалорический эффект и фазовое расслоение: теория и перспективы // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1065–1073.
27. *Колесов К.А., Маширов А.В., Иржак А.В., Чичков М.В., Сафрутина Е.Ф., Киселев Д.А., Кузнецов А.С., Белова О.В., Коледов В.В., Шавров В.Г.* Контактное термосопротивление медной контактной пары с графеновым термоинтерфейсом в магнитных полях до 10 Тл // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1058–1064.
28. *Соколовский В.В., Загребин М.А., Бучельников В.Д.* Магнитокалорический эффект сплавов Mn_2YSn ($Y = \text{Sc}, \text{Ti}, \text{V}$) // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1122–1128.
29. *Павлухина О.О., Соколовский В.В., Бучельников В.Д.* Электронная структура и магнитные свойства сплавов $\text{FeRhSn}_{1-x}\text{Z}_x$ ($Z = \text{Ge}, \text{Si}, \text{Sb}$): исследование из первых принципов // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1102–1107.
30. *Соколовский В.В., Бучельников В.Д.* Влияние частичного замещения Ga на структурные и магнитные свойства сплавов Гейслера Ni-Mn-Ga // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1108–1116.
31. *Мусабиров И.И., Гайфуллин Р.Ю., Сафаров И.М., Галеев Р.М., Афоничев Д.Д., Кирилук К.К., Коледов В.В., Маширов А.В., Мулюков Р.Р.* Структура и мартенситное превращение деформированных сплавов системы Ni-Mn-Ga // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1129–1136.
32. *Утарбекова М.В., Ориулевиц М.А., Батаев Д.С., Фазлитдинова А.Г., Таскаев С.В.* Магнитокалорический эффект в сплавах RCo_5 ($R = \text{Gd}, \text{Tb}, \text{Dy}, \text{Ho}$) // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1086–1092.
33. *Панкратов Н.Ю., Терёшина И.С., Никитин С.А.* Магнитокалорический эффект в редкоземельных магнетиках // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1093–1101.
34. *Вальков В.И., Головчан А.В., Грибанов И.Ф., Андрейченко Е.П., Ковалев О.Е., Митюк В.И., Маширов А.В.* Барическая трансформация характера магнитного упорядочения и магнитокалорических свойств в системе $\text{Mn}_{1-x}\text{Cr}_x\text{NiGe}$ // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1044–1050.
35. *Ерагер К.Р., Соколовский В.В., Бучельников В.Д., Гамзатов А.Г., Алиев А.М.* Фазовая стабильность сплавов Гейслера $\text{Ni}(\text{Co})-\text{Mn}-\text{Z}$ ($Z = \text{Ga}, \text{In}, \text{Sb}, \text{Sn}$) // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1137–1144.
36. *Гаджиев А.Б., Алиев А.М., Гамзатов А.Г., Ханов Л.Н., Митюк В.И., Говор Г.А.* Магнитострикция и магнитокалорический эффект в сплавах $\text{Mn}_{1-x}\text{Fe}_x\text{As}$ // *ФММ.* 2023. Т. 124. № 11. С. 1117–1121.

Modern Magnetocaloric Materials: Existing Problems and Research Prospects

V. V. Sokolovskiy¹, M. A. Zagrebin¹, V. D. Buchelnikov¹, and V. V. Marchenkov^{2, 3, *}

¹Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, 454001 Russia

²Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620108 Russia

³Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002 Russia

*e-mail: march@imp.uran.ru

Abstract—A brief review of works related to a new and promising direction — magnetic cooling technology based on the magnetocaloric effect (MCE) is presented. The essence of the effect and the main publications related to this area are briefly considered. The materials in which the MCE is observed are reported and the corresponding diagrams of the main publications on the MCE for the last 5 years are presented. The latest results of research by Russian scientists working in this field are presented.

Keywords: magnetic cooling technology, magnetocaloric effect, magnetic and magnetothermal properties, phase transitions