

Лаборатория физики низких температур и магнетизма
института физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН
Институт радиотехники и электроники
им В. А. Котельникова РАН
Челябинский государственный университет

**ДНИ КАЛОРИКИ В ДАГЕСТАНЕ:
Мультикалорические материалы
и их приложения**

Сборник тезисов

**16—20 сентября 2020 г.
Гуниб, Дагестан, Россия**

Челябинск
Издательство Челябинского государственного университета
2020

УДК 620
ББК Ж03
Д548

Организационный комитет

Сопредседатели

А. М. Алиев, Махачкала, Россия;
В. Г. Шавров, Москва, Россия;
С. В. Таскаев, Челябинск, Россия.

Секретарь

А. Г. Гамзатов, Махачкала, Россия

Локальный и программный комитет

А. Б. Батдалов, В. Д. Бучельников, В. В. Коледов,
И. В. Бычков, М. А. Загребин, А. А. Амиров

Д548

Дни калорики в Дагестане: мультикалорические материалы и их приложения : сб. тез. (16—20 сентября 2020 г., Гуниб, Дагестан, Россия). — Челябинск : Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2020. — 80 с.

ISBN 978-5-7271-1700-2

Представлены тезисы семинара «Дни калорики в Дагестане: мультикалорические материалы и их приложения». Тезисы охватывают исследования мультикалорических материалов и их приложения и включают направления, связанные с экспериментальным исследованием новых материалов с гигантскими калорическими и связанными с ними эффектами, теоретическими исследованиями и численным моделированием перспективных калорических и мультикалорических материалов; а также практические приложения на основе гигантских эффектов в мультикалорических и мультифункциональных материалах.

Результаты, представленные в сборнике, могут быть использованы в системе обучения и переподготовки кадров. Адресовано научным работникам, аспирантам и студентам физических и математических факультетов.

УДК 620.22(082)
ББК Ж03я43

ISBN 978-5-7271-1700-2

© Челябинский государственный университет, 2020

Фазовые переходы и функциональные свойства высокотемпературных сверхпроводников с топологией интерферометра

В. Коледов¹, А. Петров¹, А. Иржак^{1,2,3}, С. Фонтратовски¹,
А. Маширов¹, В. Шавров¹, А. Каманцев¹, А. Несолонов¹,
П. Лега¹, А. Орлов¹, С. Зыбцев¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия. victor_koledov@mail.ru;

² Институт проблем технологии микроэлектроники
и особочистых материалов РАН, Черноголовка, Россия;

³ НИТУ МИСиС, Москва, Россия.

Изучение принципов и создание альтернативных систем охлаждения при криогенных температурах в области от температуры кипения жидкого гелия до жидкого азота весьма актуальны для самых различных технических и медицинских применений. Для их разработки требуются альтернативные подходы не только к проблеме поиска активного материала с мультикалорическим эффектом для рабочего тела, но также и к организации управляемых тепловых потоков для реализации высокоэффективных циклов охлаждения. С этой целью во всем мире проводится поиск новых физических эффектов манипуляции тепловыми потоками, включая тепловое выпрямление, квантование теплового потока в квантовых интерферометрах и т. д. [1; 2].

Цель настоящей работы — изучение явлений квантового электрического транспорта в вискерах (нитевидных монокристаллах) однофазного соединения 2212 BSCCO с температурой сверхпроводящего перехода выше температуры кипения жидкого азота [3]. Описаны предварительные результаты технологических экспериментов по созданию и исследованию структур в конфигурации двух- и многосвязных сверхпроводящих квантовых интерферометров и поиску новых эффектов квантовой теплопроводности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 18-57-34002 и 17-57-80122.

- [1] Giazotto, F., & Martínez-Pérez, M. J. (2012). The Josephson heat interferometer. *Nature*, 492(7429), 401—405.
- [2] Hwang, S. Y., & Sothmann, B. (2020). Phase-coherent caloritronics with ordinary and topological Josephson junctions. *The European Physical Journal Special Topics*, 229(4), 683—705.
- [3] Latyshev, Y. I., Gorlova, I. G., Nikitina, A. M., Antokhina, V. U., Zyb-tsev, S. G., Kukhta, N. P., Timofeev, V. N. (1993). Growth and study of single-phase 2212 BSCCO whiskers of submicron cross-sectional area. *Physica C: Superconductivity*, 216(3—4), 471—477.

Термомеханические свойства и эластокалорический эффект в сплаве Ti_2NiCu при разной степени кристаллизации

Е. В. Морозов¹, В. В. Коледов¹, В. Г. Шавров¹, И. А. Знаменская²,
Т. А. Кули-заде², А. В. Шеляков³, Л. С. Метлов^{4,5}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия. evgvmorozov@gmail.com;

² Московский государственный университет, физический факультет, Москва, Россия;

³ НИЯУ Московский инженерно-физический институт, Москва, Россия;

⁴ Донецкий физико-технический институт, Донецк, Украина,

⁵ Донецкий национальный университет, Донецк, Украина

В последние годы огромный интерес вызывает создание и изучение новых функциональных материалов. Много работ посвящено миниатюрным и быстродействующим актуаторам на основе сплавов с термоупругим мартенситным переходом и эффектом памяти формы (ЭПФ), множество работ посвящено изучению эластокалорического эффекта (ЭКЭ) в этих сплавах, который, по существу, является эффектом, обратным ЭПФ и, как предполагается, может быть основой новой технологии твердотельного охлаждения.

Анализ мировой литературы показывает, что исследования аморфных сплавов и аморфно-кристаллических композитов привлекают большое внимание [1—4]. В работе [1] аморфизация металлов приводит к повышению их прочности. В работе [5] говорится об улучшении коррозионной стойкости при аморфизации металлов и т. д. На сегодняшний день изучению функциональных свойств

аморфнокристаллических и аморфных сплавов с ЭПФ уделяется недостаточное внимание, в то время как авторами в работе [6] показано, что аморфнокристаллические композиты сплавов с ЭПФ могут иметь очень важные функциональные свойства, особенно в микро- и наномасштабе.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение свойств быстрозакаленного сплава Ti_2NiCu в виде лент при периодических растягивающих механических напряжениях с частотой до 50 Гц и создание физической модели ЭКЭ. ЭКЭ был измерен авторами методом скоростной термографии в быстрозакаленных лентах сплава Ti_2NiCu в аморфном и поликристаллическом состоянии при механических нагрузках до 300 МПа с частотой до 50 Гц (см. рис. 1а). Максимальное значение ЭКЭ в кристаллическом состоянии составляет 21 К при нагрузке 300 МПа и температуре 339 К (Рис. 1б). В аморфных лентах сплава Ti_2NiCu при частотах до 10 Гц, в температурном диапазоне от 300 К до 365 К максимальное значение ЭКЭ составляет 2 К при нагрузке 300 МПа. Предложенная теоретическая модель хорошо объясняет знак и величину ЭКЭ в различных структурных состояниях сплава.

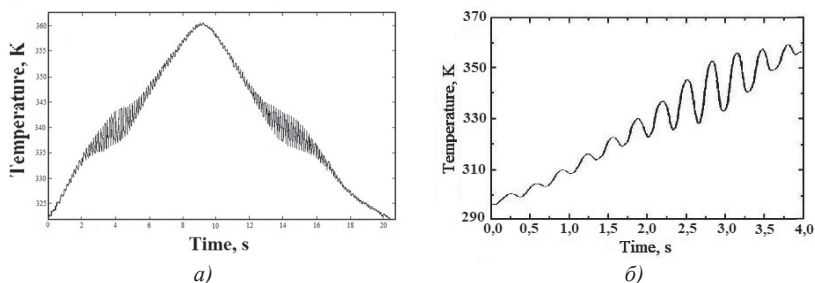


Рис. 1. ЭКЭ в быстрозакаленном сплаве Ti_2NiCu при периодическом воздействии растягивающей силы.

- а) — временная зависимость температуры периодически растягиваемого образца при медленно нагреве/охлаждении;*
- б) — ЭКЭ при постепенном нагреве под воздействием внешнего периодического растяжения с частотой 3 Гц, с амплитудой периодического механического напряжения 300 МПа*

Аморфнокристаллические композиты сплава Ti_2NiCu имеют функциональные свойства как от аморфной, так и поликристаллической составляющей (рис. 2). Аморфная часть (рис. 2а) обладает большим показателем приводящего к удлинению теплового



расширения (положительная деформация), поликристаллическая часть (рис. 2б) — ЭПФ, приводящий к сжатию (отрицательная деформация). Также, такие композиты имеют своеобразный «инвариный» эффект (рис. 2в). При правильном подборе температуры и механического напряжения можно управлять точками с инвариными свойствами.

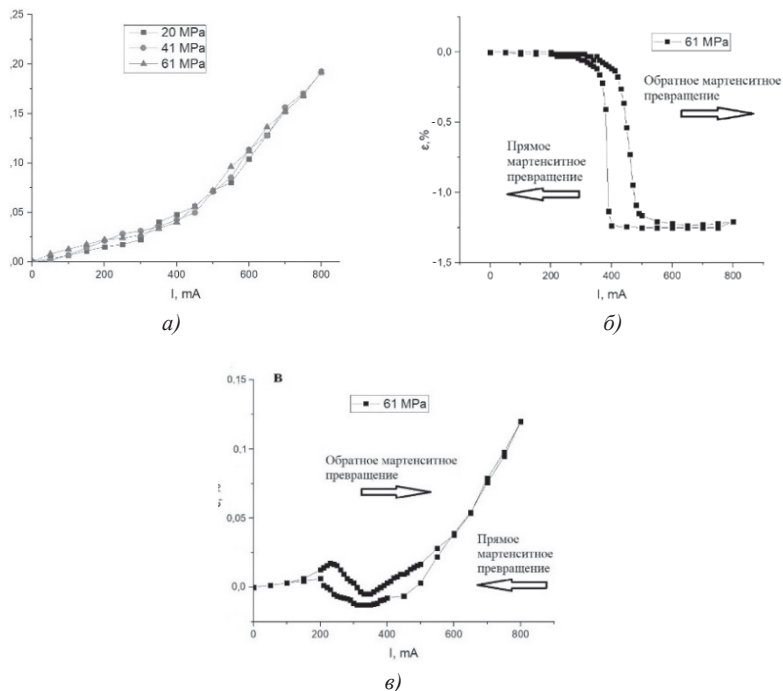


Рис. 2. Зависимость относительной деформации ϵ (%) от силы тока, I (mA):
 а — аморфное состояние, б — кристаллическое состояние,
 в — аморфнокристаллический композит

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 17-19-01748.

- [1] Inoue A. Stabilization of metallic supercooled liquid and bulk amorphous alloys //Acta materialia. — 2000. — Vol. 48, №. 1. — P. 279—306.
- [2] Amorphization of Ni 61 Nb 39 Alloy by Laser Surface Treatment / Z. Lu et al. //Journal of Iron and Steel Research International. — 2016. — Vol. 23, № 1. — P. 37—41.



- [3] Surface vitrification of alloys by pulsed electrical discharge treatment // *Journal of Alloys and Compounds* / L. Zuo et al. — 2017. — Vol. 707. — P. 148—154.
- [4] Amorphous/crystalline Fe₅₅Ni₂₀Cu₅P₁₀Si₅B₅ composite produced by two-component melt—spinning / K. Ziewicz et al. // *Materials Science and Technology*. — 2019. — P. 1—7.
- [5] Fabrication of Metallic Glass Layers on Al Alloys with Improved Corrosion Resistance and Micro-Hardness by Pulsed Electrical Discharge Treatment / H. Dai et al. // *Applied Sciences*. — 2018. — Vol. 8, № 6. — P. 956.
- [6] Lega P., Koledov V., Orlov A., Kuchin D., Frolov A., Shavrov V., & Khovaylo V. Composite Materials Based on Shape Memory Ti₂NiCu Alloy for Frontier Micro and Nanomechanical Applications // *Advanced Engineering Materials*. — 2017. — № 19(8). — P. 1700154.

Магнитотермические аномалии в LaFe_{11,1}Mn_{0,1}Co_{0,7}Si_{1,1}

Н. Э. Абдулкадирова¹, А. М. Алиев¹, А. Г. Гамзатов¹ и Р. Себара²

¹ Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия. nnurizhat@mail.ru;

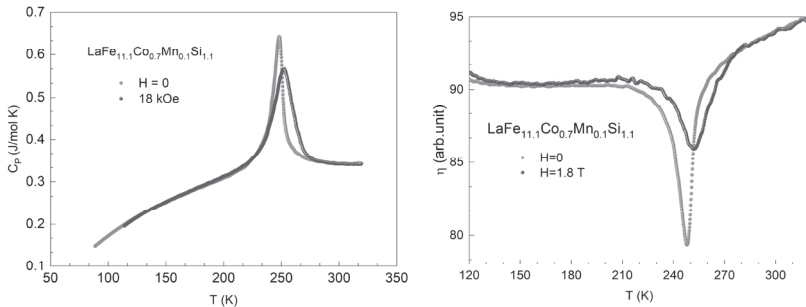
² Institute of Physics, Czestochowa University of Technology,
Armii Krajowej 19, 42-200 Czestochowa, Poland.

Важным составляющим в понимании природы эффектов деградации магнитокалорических свойств в переменных (циклических) магнитных полях является изучение механизмов тепло- и электропереноса во внешних магнитных полях. В данной работе мы приводим результаты экспериментальных исследований влияния магнитного поля $H = 1,8$ Т на температурные зависимости теплоемкости, температурапроводности и теплопроводности для соединений LaFe_{11,1}Mn_{0,1}Co_{0,7}Si_{1,1} в интервале температур 80—320 К.

Частичное замещение Mn для системы LaFe_{11,1}Mn_{0,1}Co_{0,7}Si_{1,1} приводит к изменению фактора толерантности и параметра беспорядка, вызванный различием ионного радиуса. Это, в свою очередь, приводит к деформации кристаллической решетки и к изменениям длин межатомных связей и валентных углов, от которых зависит интенсивность обменных взаимодействий. Все эти изменения будут сказываться на исследуемых макроскопических параметрах

(теплоемкость, теплопроводность, температурапроводность) и поведении их в магнитном поле.

В соединении $\text{LaFe}_{11.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.7}\text{Si}_{1.1}$ наблюдаются ярко выраженные аномалии теплоемкости, температурапроводности и теплопроводности, связанные с фазовым переходом ФМ-ПМ (см. рисунок).



Температурная зависимость теплоемкости и термодиффузии в поле 1,8 T и без поля для $\text{LaFe}_{11.1}\text{Co}_{0.7}\text{Mn}_{0.1}\text{Si}_{1.1}$

В магнитном поле 1,8 T эти аномалии существенно подавляются. Анализ температурных зависимостей магнитотемпературапроводности и магнитотеплопроводности в магнитном поле показывает, что магнитотемпературапроводность более чем в два раза чувствительна к магнитному полю 1,8 T, чем магнитотеплопроводность.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 18-12-00415

Мультикалорики — новые материалы энергетики и стрейнтроники

А. А. Амиров

Лаборатория новых магнитных материалов, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия. amiroff_a@mail.ru

В последние годы значительно вырос интерес к поиску и исследованию материалов, в которых наблюдаются гигантские калорические эффекты (КЭ) различной природы, в связи с возможностью

различного типа связности, калорические и мультикалорические эффекты в которых, являются продуктом свойств каждой из компонент, а также результатом их межфазного взаимодействия.

Экспериментальные работы по поиску «природных» мультикалориков с комбинированными магнитокалорическим и электрокалорическим эффектами не достигли существенного прогресса. Такие соединения преимущественно демонстрируют слабый магнитоэлектрический эффект, а калорические и мультикалорические эффекты в основном наблюдаются в области низких температур, что делает их практическое применение невозможным. Более успешным оказался подход по изучению природных магнитокалорических материалов с фазовым переходом 1-го рода при одновременном или последовательном наложении магнитного поля и гидростатического (или одноосного) давления [1]. Так, на примере сплава Гейслера показана возможность использования мультикалорического подхода эффекта для уменьшения гистерезисных эффектов) в материалах с гигантским магнитокалорическим эффектом и улучшения эффективности цикла, основанного на магнитном охлаждении.

В композитных мультикалориках (в частности, в магнитоэлектрических композитах) экспериментально продемонстрирована возможность управления температурой фазового перехода и гистерезисом магнитной компоненты композита, через механическое воздействие пьезоэлектрической компоненты, при подаче на неё электрического напряжения [2].

В настоящее время в экспериментальных исследованиях мультикалорических эффектов можно выделить следующие тенденции: а) поиск, получение и исследование новых композитных структур (смесевых (керамических, полимерных), цилиндрических, слоистых, состоящих из компонентов с исходными высокими значениями калорических эффектов, магнитострикционных и пьезоэлектрических параметров в области комнатных температур; б) развитие и совершенствование экспериментальных методик одновременного приложения постоянных и циклических внешних полей (магнитного, электрического и механического) в «природных» мультикалориках. Описанные подходы помогут в поиске и прогнозировании новых структур с высокими значениями мультикалорических эффектов для энергетики и стрейнтроники.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(проект № 18-79-10176)*



- [1] Gottschall T., Gràcia-Condal A., Fries M., Taubel A., Pfeuffer L., Mañosa L., Planes A., Skokov K. P. and Gutfleisch O. *Nature Materials* **17**, 929 (2018).
- [2] Liu Y. et al. *Nature communications* **7**, 11614 (2016).

Влияние магнитной структуры $Er_{1-x}Y_x(\text{Co}_{0,84}\text{Fe}_{0,16})_2$ на магнитокалорический эффект

М. С. Аникин¹, Е. Н. Тарасов¹, Д. С. Незнахин¹, М. А. Сёмкин^{1,2},
Н. В. Селезнёва³, С. В. Андреев³, А. В. Зинин¹

¹ Уральский федеральный университете, Екатеринбург, Россия.
maksim.anikin@urfu.ru

² Институт физики металлов им. М. Н. Михеева УрО РАН,
Екатеринбург, Россия. *semkin@imp.uran.ru*

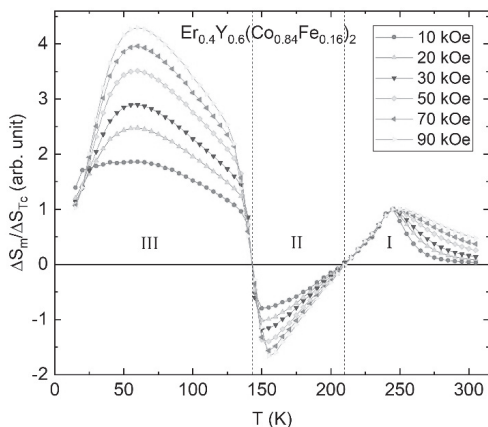
Ранее при исследовании соединений $R(\text{Co}_{1-x}\text{Fe}_x)_2$ ($x = 0 - 0,16$) с тяжелыми редкоземельными элементами (R) было установлено, что частичное замещение Co на Fe приводит к возникновению магнитокалорического эффекта (МКЭ) в широком диапазоне температур ниже температур Кюри (T_c) [1]. Позже в [2] было показано, что ширина пика изотермического изменения энтропии (ΔS_m) на половине высоты максимума (ΔT_{FWHM}) зависит не только от концентрации железа (x), но и от типа редкоземельного металла. Зависимость от элемента R авторы связали с различной величиной энергии междодреточного обменного взаимодействия R-3d, ссылаясь на данные [3], где описаны магнитные свойства бинарных соединений $R\text{Co}_2$ и $R\text{Fe}_2$. Для выявления роли обменных взаимодействий в образовании МКЭ в таких системах мы подготовили серию соединений $Er_{1-x}Y_x(\text{Co}_{0,84}\text{Fe}_{0,16})_2$ ($x = 0 - 1$), в которых магнитоактивный R-элемент (Er) заменен на немагнитный — иттрий (Y).

При исследовании квазибинарных соединений $Er_{1-x}Y_x(\text{Co}_{0,84}\text{Fe}_{0,16})_2$ установлено, что при замещении эрбия на немагнитный иттрий реализуются четыре типа магнитной структуры:

- 1) $x \leq 0,4$ — ферримагнетики, намагниченность (σ) сонаправлена с намагниченностью редкоземельной подрешетки (M_R);
- 2) $x = 0,6$ — ферримагнетик с точкой компенсации;
- 3) $x = 0,8$ — ферримагнетик, σ сонаправлена с намагниченностью 3d-металлов (M_{3d});

4) $x = 1$ — ферромагнетик.

Для каждой магнитной структуры характерны свои температурные зависимости намагниченности (σ), высокополевой восприимчивости (χ_{hf}) и изменения магнитной части энтропии (ΔS_m). Для примера на рисунке представлены приведенные к значению ΔS_m в T_c температурные зависимости магнитного вклада в энтропию $\Delta S_m / \Delta S_{Tc}(T)$ в различных по напряженности магнитных полях, для образца с точкой магнитной компенсации, на которых можно выделить три области: I — прямой МКЭ в окрестности T_c , II — обратный МКЭ выше точки магнитной компенсации (T_{comp}) и III — прямой МКЭ ниже T_{comp} . В ферромагнитном соединении $Y(\text{Co}_{0,84}\text{Fe}_{0,16})_2$ с немагнитным иттрием наряду с магнитным вкладом в энтропию при температуре Кюри существует ΔS_m в широкой области ниже T_c .



Зависимости $\Delta S_m / \Delta S_{Tc}(T)$ для соединения $Er_{1-x}Y_x(\text{Co}_{0,84}\text{Fe}_{0,16})_2$.

Вертикальные пунктирные линии отделяют температурные области I, II и III

При температуре 5 К концентрационные зависимости намагниченности на формульную единицу (μ_B) в 90 кЭ, остаточной намагниченности (M_r) и коэрцитивной силы (H_c) имеют экстремумы при промежуточных значениях x .

Параметр кристаллической решетки (a) при увеличении содержания иттрия (x) непрерывно растет. В то же время зависимость $T_c(x)$ имеет локальный максимум при $x = 0,6$, что может быть связано с неэквивалентным замещением эрбия на иттрий, приводящим то к ослаблению, то усилению межподрешеточного обменного взаимодействия [4].

наличие большой величины магнитокалорического эффекта при относительно небольшом изменении магнитного поля. До недавнего времени не уточнялось, при каких условиях должен наблюдаться большой магнитокалорический эффект. Так как оказалось, что большинство материалов с гигантским МКЭ — это материалы с магнитоструктурными фазовыми переходами первого рода, то величина МКЭ при первом и последующих циклах приложения магнитного поля могут существенно различаться, причем это различие может носить и необратимый характер. Также может наблюдаться обратимое изменение магнитокалорических свойств материалов с изменением частоты приложенного магнитного поля. Соответственно, требуются исследования магнитокалорических свойств в циклических магнитных полях.

В данной работе приводятся описание разработанных нами методов исследования магнитокалорических и связанных с ними свойств материалов в циклических магнитных полях. Обсуждаются преимущества и недостатки этих методов. Приведено также описание созданных нами, а также коммерческих источников магнитных полей.

Приведены результаты исследования магнитокалорических и родственных свойств различных магнитокалорических материалов. Обсуждается возможная природа наблюдаемых особенностей, включая сильную частотную зависимость и деградацию МКЭ в циклических магнитных полях. Для однозначного установления природы этих особенностей требуются более глубокие исследования магнитных, тепловых и структурных свойств магнитокалорических материалов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ
(грант № 18-12-00415)*



Физические и магнитокалорические свойства твёрдых растворов $Du_{100-x}In_x$

М. Ю. Богуш¹, С. В. Таскаев^{1,2}, В. В. Ховаило³,
М. Н. Ульянов^{1,4}, Д. С. Батаев¹, Д. В. Плахотский¹,
М. А. Гаврилова¹, М. В. Кононова³, Zhang Hu⁵

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ),
Челябинск, Россия. *tsv@csu.ru*

³ Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия.
khovaylo@gmail.com

⁴ Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия. *max-39@yandex.ru*

⁵ University of Science and Technology Beijing, Beijing, P. R. China.
zhanghu@ustb.edu.cn

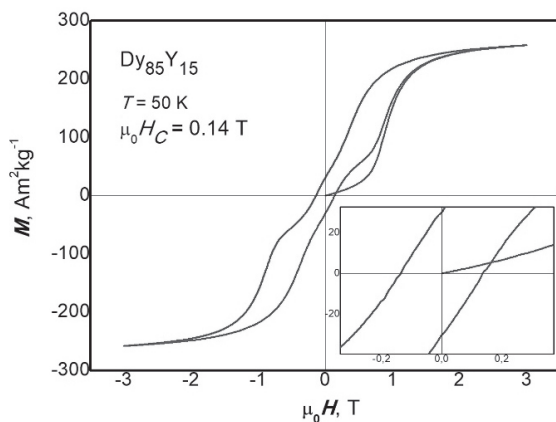
Одними из важных проблем современности являются проблемы в сферах экологии и невозобновляемых природных ресурсов. Поиск решения этих проблем являются актуальными задачами современной физики. Стабильно растущий спрос на источники энергии заставляет разрабатывать и адаптировать существующие установки к работе на природном газе. Что, в свою очередь, требует его бесперебойной подачи к потребителю. Однако транспортировка природного газа в основном состоянии является невыгодным и опасным процессом. Одним из вариантов безопасного хранения и транспортировки природного газа является его транспортировка в сжиженном состоянии [1]. Температура сжижения природного газа находится в диапазонах 70—115 К. Это диапазон криогенных температур, в котором классические газовые технологии охлаждения являются дорогими, крупногабаритными и обладают низким эффектом. Создание материалов, которые могли бы применяться в современных охлаждающих до криогенных температур установках, является необходимым направлением исследований, а такими установками являются так называемые магнитные холодильники.

Магнитные материалы применяются повсеместно и обладают большим количеством интересных свойств. Например, способностью изменять свою внутреннюю энергию (температуру) путём воздействия на него внешнего магнитного поля. Такая способность носит название магнитокалорический эффект (МКЭ). Для создания

эффективных охладительных систем требуются материалы с большим значением МКЭ. Эти материалы возможно получить используя редкоземельные элементы и комбинируя их с 3-*d* металлами и металлоидами [2]. В частности, при малом легировании 4-*f* элементов можно получить их твердые растворы. Именно к такому классу относятся исследуемые в настоящей работе соединения $Du_{100-x}In_x$: атомы индия в ходе аргон-дуговой плавки растворяются в подсистеме диспрозия и образуют твердый раствор замещения. Растворимость индия при высоких температурах составляет около 10 ат. %, но с уменьшением температуры падает. Для приготовления твердых растворов мы ограничились составами с $x = 0...3$: $Du_{99}In_1$, $Du_{98}In_2$, $Du_{97}In_3$.

Все синтезированные образцы подверглись тщательному анализу: проведена сканирующая электронная микроскопия шлифованной поверхности каждого образца, проведен рентгеноструктурный и рентгенофазовый анализы, установлены температурные и полевые зависимости намагниченности сплавов, определена точка Кюри по кривым Белова — Аррота.

На рисунке приведена полевая зависимость намагниченности и петли гистерезиса сплава $Du_{98}In_2$ при температуре 50К. Сплав обладает низкой коэрцитивной силой (~590 Э), вместе с тем — высоким значением магнитного момента. По полученным данным можно утверждать, что твердые растворы $Du_{100-x}In_x$ могут иметь перспективы применения в качестве рабочего тела в технологиях магнитного охлаждения природного газа.



Петля гистерезиса сплава $Du_{98}In_2$ при температуре 50 К

Технология магнитного охлаждения основана на способности любого магнитного материала изменять свою температуру и энтропию под воздействием внешнего магнитного поля. Такое изменение температуры и энтропии магнитного материала при изменении напряженности магнитного поля, в котором он находится, называется магнитокалорическим эффектом. Для разработки системы сжижения природных газов необходимо, чтобы материал обладал хорошими магнитокалорическими свойствами при криогенных температурах и был способен циклически работать в очень сильных магнитных полях. Современные достижения в области сверхпроводимости позволили создавать сверхпроводящие катушки, способные генерировать такие сильные поля, что стало ключевым моментом в выборе этой технологии охлаждения.

Для температур примерно равных 80К в качестве рабочего тела в магнитной установке были выбраны сплавы, представленные твердыми растворами диспрозия $Du_{100-x}Y_x$: $Du_{95}Y_5$, $Du_{90}Y_{10}$, $Du_{85}M_{15}$. Иттрий обладает 100 % растворимостью в диспрозии и формирование твердых растворов происходит на всем диапазоне концентраций, однако с увеличением концентрации иттрия падает и магнитокалорический эффект, поэтому исследование ограничено составом $Du_{85}M_{15}$.

Образцы синтезированы методом аргон-дуговой плавки в атмосфере чистого аргона. Каждый готовый образец был исследован методами сканирующей электронной микроскопии, рентгеновской диффрактометрии, вибрационной магнитометрии. Получены температурные и полевые зависимости сплавов, определена точка фазового перехода по кривым Белова — Аррота, рассчитаны постоянные решетки и пр. характеристики.

На рисунке приведены полевая зависимость намагниченности сплава $Du_{85}Y_{15}$ и петля гистерезиса при температуре 50 К. Этот твердый раствор показывает сложную картину фазовых превращений в материале, что отражается в ступенчатой форме петли гистерезиса [2].



Изучение явлений магнетизма даёт возможность совершенствовать существующее и создавать новое оборудование, которое будет обладать принципиально лучшими свойствами, чем их предшественники. Например, существующие охладительные установки, потребляющие примерно 20 % от всего объема производимой электроэнергии. Это говорит о том, что привычные нам системы охлаждения, оборудованные компрессором, являются экономически неэффективными. Исходя из этого существует потребность в принципиально новой технологии охлаждения, которая позволит изменить температуру объектов в широком диапазоне, вплоть до криогенных значений. Одной из таких технологий является технология магнитного охлаждения, основанная на магнитокалорическом эффекте.

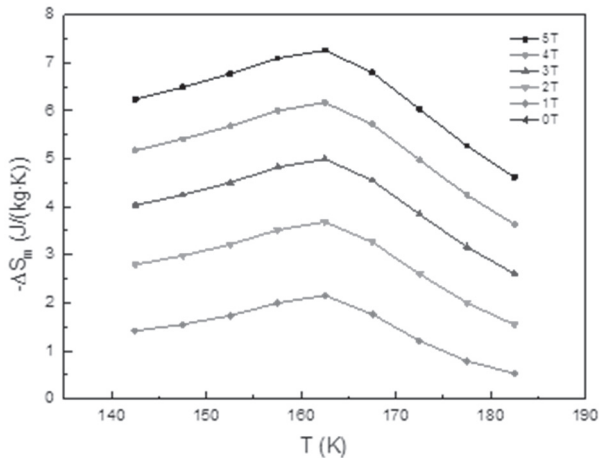
Изменение температуры магнитного материала происходит в результате перераспределения внутренней энергии магнитного вещества между системой магнитных моментов его атомов и кристаллической решеткой. Максимальной величины МКЭ достигает в магнитоупорядоченных материалах, таких как ферромагнетики, антиферромагнетики и т. п., при температурах магнитных фазовых переходов (температурах магнитного упорядочения — Кюри, Нееля и т. д.) [1]. Главное преимущество аппаратов для магнитного охлаждения связано с высокой плотностью материала — твердого тела — по сравнению с плотностью пара или газа. Изменение энтропии на единицу объема в твердых магнитных материалах в 7 раз выше, чем в газе. Это позволяет делать значительно более компактные холодильники, используя в качестве рабочего тела магнитный материал. Само магнитное рабочее тело служит аналогом хладагентов, используемых в традиционных парогазовых холодильных установках, а процесс размагничивания-намагничивания — аналогом циклов сжатия — расширения.

Одной из сфер применения технологии магнитного охлаждения в промышленности может стать сжижение природного газа. Температуры, при которых происходит изменение агрегатного состояния из газообразного в жидкое находится в области криогенных температур. А т. к. установка магнитного охлаждения должна работать с различными газами, то рабочий диапазон должен быть широким. Для рабочей температуры 163—165 К мы синтезировали образец $GdAl_2$. Этот сплав относится к фазе Лавеса. Образец был получен путём троекратного аргон-дугового плавления в атмосфере чистого аргона.



Результаты исследований методами сканирующей электронной микроскопии показывают почти однородный контраст, что соответствует однофазному образцу. Исходя из данных энергодисперсионной спектроскопии атомное содержание элементов в исследованном сплаве составляет для Gd — 68,39 at. %, для Al — 31,61 at. %. Такой же вывод следует из данных рентгенофазового анализа, представленных на рисунке. Исходя из данных рентгеноструктурного и рентгенофазового анализов, пики дифракционного профиля тонкие, что соответствует хорошо кристаллизующемуся однородному образцу. GdAl₂ содержит чистый GdAl₂, в небольшом количестве был идентифицирован примесный оксид Gd₂O₃.

Петля гистерезиса, полученная при температуре 50К показывает, что сплав является магнитомягким и не имеет сколь-нибудь значимой коэрцитивной силы. При комнатных температурах сплав является парамагнетиком. Температурные зависимости намагниченности, измеренные в полях до 3Т соответствуют классическому ферромагнетику с точкой Кюри $T_c = 163 \text{ K}$ [2]. Рассчитанные из этих данных температурные зависимости магнитокалорического эффекта приведены на рисунке. Расчет произведен до внешних магнитных полей равных 5 Тл.



Температурные зависимости магнитокалорического эффекта в GdAl₂ в полях до 5Т

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ (№ 18-42-06201).



- [1] O. Gutfleisch, T. Gottschall, M. Fries, D. Benke, I. Radulov, K.P. Skokov, H. Wende, M. Gruner, M. Acet, P. Entel, M. Farle, *Mastering hysteresis in magnetocaloric materials*, *Phil. Trans. R. Soc. A* **374** (2016) 20150308.

Физические свойства сплава $GdNi_2$ в криогенных температурах при воздействии высоких полей до 50Т.

М. Ю. Богущ¹, С. В. Таскаев^{1, 2}, В. В. Ховайло³,
М. Н. Ульянов^{1, 4}, Д. С. Батаев¹, Д. В. Плахотский¹,
М. А. Гаврилова¹, М. В. Кононова³, Zhang Hu⁵

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

² Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия. *tsv@csu.ru*

³ Московский институт стали и сплавов, Москва, Россия.
khovaylo@gmail.com

⁴ Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия. *max-39@yandex.ru*

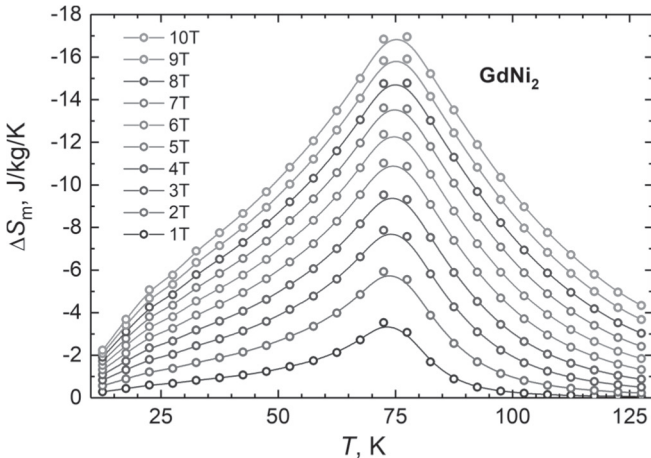
⁵ University of Science and Technology Beijing, Beijing, P. R. China.
zhanghu@ustb.edu.cn

Изучение и создание альтернативных систем охлаждения, в основу которых положен магнитокалорический эффект (МКЭ) является актуальным и перспективным направлением современной физики твёрдого тела. Несмотря на то, что первые интенсивные исследования МКЭ начались более 60 лет назад, это направление можно считать малоизученным и требующим большего внимания [1]. Кроме того, исследование рынка показывает потребности населения не только в охлаждении помещений, но и в создании систем сжижения природного газа для его хранения и перемещения.

Для создания магнитных охлаждающих систем требуется синтез материалов с высоким МКЭ, которые и будут рабочим телом данной системы. Одним из таких материалов может стать синтезированный нами сплав $GdNi_2$. Это поликристаллический образец, структура которого соответствует кубической фазе типа фазы Лавеса с параметром решетки $a = 0,7206$ нм. Учитывая, что коллинеарный ферромагнетик $GdNi$, который также в незначительном

количестве представлен в нашем образце GdNi₂ как примесная фаза, проявляет магнитные свойства (температура Кюри $T_c = 70$ К и магнитный момент $\sim 8,5$ μB) [2], очень похожие на исследуемый GdNi₂, мы предполагаем, что экспериментально полученные магнитные характеристики можно рассматривать как соответствующие чистой фазе GdNi₂.

Проведя большое количество измерений и обработав их, мы можем характеризовать сплав GdNi₂ как магнитомягкий материал с величиной коэрцитивной силы $\mu_0 H_c \approx 10$ Э. А из зависимостей Белова-Аррота температура Кюри составляет $T_c = 70$ К. Магнитокалорический эффект в полях до 10 Т, рассчитанный косвенным методом из полевых зависимостей намагниченности на основе соотношения Максвелла, представлен на рисунке.



Магнитокалорический эффект в сплаве GdNi₂

При изменении магнитного поля на 10 Тл, которое может быть легко создано сверхпроводящими магнитами, очевидно, что наш образец GdNi₂ может работать в широком температурном окне со значительным магнитокалорическим эффектом.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ (№ 18-42-06201).

[1] O. Gutfleisch, M. A. Willard, E. Brück, C. H. Chen, S. G. Sankar, and J. P. Liu, *Adv. Mater.* **23**, 821—842 (2011).



- [2] D. Paudyal, Y. Mudryk, Y. B. Lee, V. K. Pecharsky, K. A. Gschneidner, Jr., and B. N. Harmon, Phys. Rev. B **78**, 184436 (2008).

Фазовые превращения и связанные с ними свойства в мультифункциональных керамических материалах

М. С. Быбик¹, А. Р. Barranco², Г. А. Шандрюк³, В. В. Коледов¹,
Д. Д. Кузнецов¹, В. С. Калашников¹, А. В. Несолёнов¹, В. Г. Шавров¹

¹ ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия. *ire@cplire.ru*

² Physics Faculty-Institute of Materials and Reagents for Electronics, Havana University, San Ldzaro y L, Vedado. La Habana, CUBA. *layla@rect.uh.cu*

³ Институт нефтехимического синтеза имени А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия. *director@ips.ac.ru*

Работа посвящена поиску новых свойств в мультифункциональных ферроэлектрических материалах — керамике на основе свинца, лантана, циркония и титана, полученной методом горячего прессования. Такие керамики могут обладать рядом крайне привлекательных свойств, такими как: сегнетоэластичностью, высоким коэффициентом электромеханической связи, а также в них предполагается наличие эластокалорического, электрокалорического и эффекта памяти формы (ЭПФ) [1].

Образцы $(1-x)\text{PbZrO}_3 - \text{PbTiO}_3 + 2,5$ моль % La_2O_3 ($x = 0,47$) (ЦТОЛ) были получены с использованием стандартных методов керамического или горячего прессования. Прокаливание и измельчение исходных компонентов осуществляли одновременно с использованием сферической мельницы, выдерживаемой при температуре 600 °С. Горячепрессованную керамику, спекали при 1000 °С в течение 1 часа под давлением 6 МПа. Плотность горячепрессованных образцов ЦТОЛ составила 7,58 г/см³.

Фазовые превращения в образцах ЦТОЛ изучались методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на установке METTLER TOLEDO DSC3+, исследования методом термомеханического анализа (ТМА) проводились на установке METTLER TOLEDO SDTA 2+, ЭПФ изучался методом трёхточечного изгиба [2].

Примеры графиков показаны на рис. 1 и 2. Методом ДСК обнаружен ФП в образце ЦТОЛ, на рис. 1 видно, что материал испытывает ФП. Характерные температуры $M_s = 189^\circ\text{C}$, $M_f = 170^\circ\text{C}$, $A_s = 185^\circ\text{C}$, $A_f = 195^\circ\text{C}$.

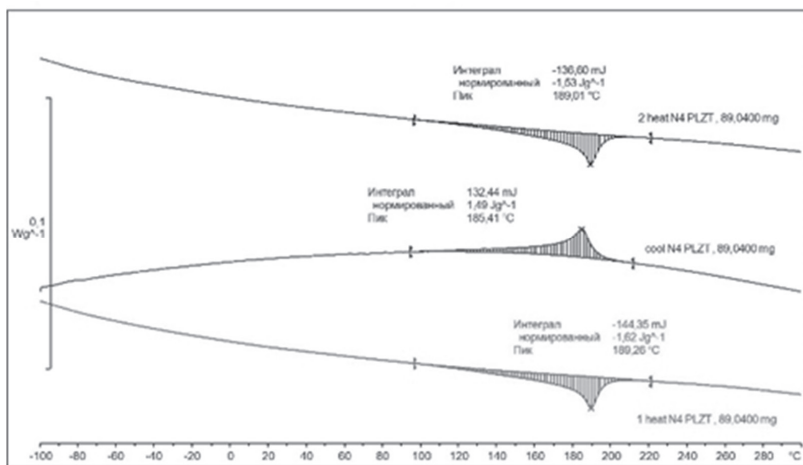


Рис. 1. Пример данных ДСК образца керамики ЦТОЛ

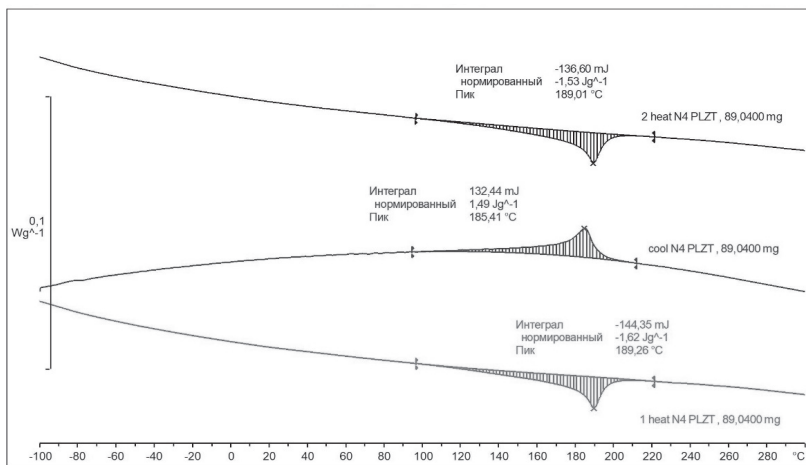


Рис. 2. Пример данных ТМА образца керамики ЦТОЛ

Ширина петли гистерезиса ФП первого рода, измеренная как расстояние между пиками теплоемкости при прямом и обратном



переходе составляет примерно 3,8 °С. Скрытая теплота прямого ФП (при охлаждении) и обратного (при нагреве) составляет: $q_{\text{cool}} = 1,49$ Дж/г, $q_{\text{heat}} = 1,62$ Дж/г соответственно. По данным ТМА характерные температуры ФП первого рода составили: $M_s = 191$ °С, $M_f = 181$ °С, $A_s = 183$ °С, $A_f = 193$ °С, что хорошо согласуется с данными ДСК (см. рис. 2).

Дальнейшие исследования направлены на поиски электро-, эластокалорических эффектов, эффектов памяти формы и других эффектов, позволяющих использовать эти материалы для практического применения и фундаментальных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-57-34002.

[1] A. Peláiz Barranco, F. Calderón Piñar, J. De los Santos Guerra & O. Pérez Martínez, *Ferroelectrics* **211:1**, 249—257 (1998).

[2] V. S. Kalashnikov, V. V. Koledov, D. S. Kuchin, A. V. Petrov, V. G. Shavrov, *Laboratory Techniques* **61**, 306—312 (2018).

[3] S. Wansleben, D.P. Landau, *Phys. Rev. B* **43**, 6006 (1991).

Радиационная теплопередача в наноструктурах при фазовом переходе

И. В. Бычков¹, Д. А. Кузьмин¹, В. А. Толкачев¹, В. Г. Шавров²

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия. *kuzminda@csu.ru*

Электродинамические флуктуации являются ключевыми для большого класса физических явлений: ван-дер-ваальсово взаимодействие, сила Казимира, бесконтактный перенос тепла, захват атомов, молекул электромагнитными ловушками и др. Как известно (см. например обзор [1] и ссылки в нем), наличие собственных электродинамических мод в системе (ее объемных и поверхностных поляритонов) приводит к резонансным особенностям в эффектах, вызываемых электродинамическими флуктуациями. Сами электродинамические свойства системы определяются ее геометрией и характеристиками материалов, из которых система состоит (в основном, диэлектрической проницаемостью и магнитной воспри-

имчивостью материалов). Если в одном из материалов в структуре происходит фазовый переход (ФП), то вблизи температуры ФП наблюдается скачок электродинамических параметров материала, что, безусловно, изменит спектр поляритонов системы.

С другой стороны, при наличии в структуре материала, претерпевающего ФП, важно понимать особенности передачи тепла между разными элементами структуры, так как это может напрямую влиять на протекание самого ФП.

В настоящей работе исследованы особенности радиационной передачи тепла в простейшей наноструктуре, состоящей из двух полупространств, занимаемых двумя разными материалами, разделенных тонким слоем (толщиной в несколько десятков нанометров) третьего материала. Предполагается, что в одном из материалов происходит ФП, который проявляется в значительном изменении диэлектрической проницаемости материала. Полученные результаты показывают, что ФП существенно изменяет характеристики термостимулированных электромагнитных полей в структуре.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00745).

[1] Е. А. Виноградов, И. А. Дорофеев, УФН **179**, 449 (2009).

Анализ особенностей магнитных и магнитокалорических свойств сплавов системы $Mn_{1-x}Co_xNiGe$ ($0,05 \leq x \leq 0,80$)

В. И. Вальков¹, А. В. Головчан¹, Г. С. Римский², В. И. Митюк²,
В. В. Коледов³, А. В. Маширов³, С. В. Таскаев⁴

¹ Донецкий физико-технический институт, Донецк, Украина.
valkov09@gmail.com

² НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

³ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

⁴ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Магнитоструктурные свойства сплавов системы $Mn_{1-x}Co_xNiGe$ [1] позволяют отнести эти материалы к функциональным с точки

зрения магнитокалорических приложений. К вопросам фундаментального характера физики магнитных явлений можно отнести ряд особенностей изменения магнитного и структурного состояния этих материалов в относительно узком ($0,1 \leq x \leq 0,15$) диапазоне концентраций Co по сравнению с общим диапазоном ($0,0 \leq x \leq 0,8$) растворимости Co . Первая особенность — это существенное уменьшение намагниченности насыщения спиновой системы за пределами диапазона $0,05 \leq x \leq 0,1$. Вторая — совмещение магнитного и структурного переходов для образцов с $x < 0,15$ (рис. 2). Третья связана с изменением характера фазовых переходов порядок-беспорядок при увеличении содержания Co : от 1-го рода при $x \leq 0,1$ до 2-го рода при $x > 0,1$ (рис. 3).

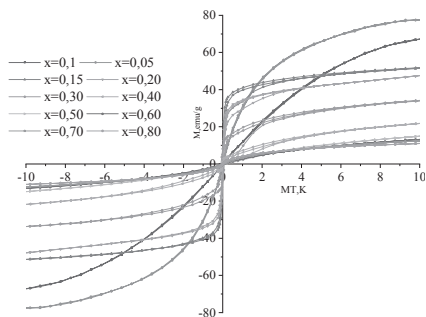


Рис. 1. Полевые зависимости намагниченности образцов системы $Mn_{1-x}Co_xNiGe$ при $T = 5K$

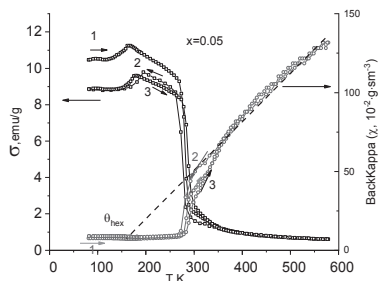


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности и обратной восприимчивости $Mn_{0,95}Co_{0,05}NiGe$

При анализе этих особенностей мы исходили из следующих предпосылок. Переходы 1-го рода, характерные для $x < 0,15$ (рис. 3) являются магнитоструктурными переходами 1-го рода $RM(hex) \leftrightarrow (FM / HM)(orth)$ и обусловлены сильным взаимодействием параметров магнитного и структурного порядков.

Присутствие структурного перехода $P6_3/mmc(hex) \leftrightarrow Pnma(orth)$, совмещенного с магнитным наряду с рентгеновскими измерениями подтверждается также аномалиями обратной восприимчивости, рис. 2, характерными для структурных переходов $(hex) \leftrightarrow (orth)$ [2].

Взаимодействующие параметры порядка описывают дальний порядок спиновой и структурной подсистем. Для $x < 0,15$ низкотемпературное (НТ) состояние является ромбическим «высокоспиновым» гелимагнетиком (HM) без присутствия пространственно-однородной компоненты-М, характерной для ферромагнетизма.

Гелимагнитное состояние соответствует мягкой гелимагнитной моде с волновым вектором $q \parallel c_h$. Поэтому уже в относительно слабых магнитных полях возникает значительная спонтанная намагниченность M (рис. 2, 3) Парамагнитное (PM) состояние для всех образцов является гексагональным ($P6_3/mmc$). При $x \geq 0,2$ упорядоченное низкотемпературное состояние является гексагональным ферромагнетиком ($P6_3/mmc$), $M \neq 0$. При этом магнитное упорядочение реализуется как изоструктурный переход 2-го рода $PM(hex) \leftrightarrow FM_ (hex)$. Ферромагнитный порядок, как видно из рис. 1, соответствует «низкоспиновому состоянию».

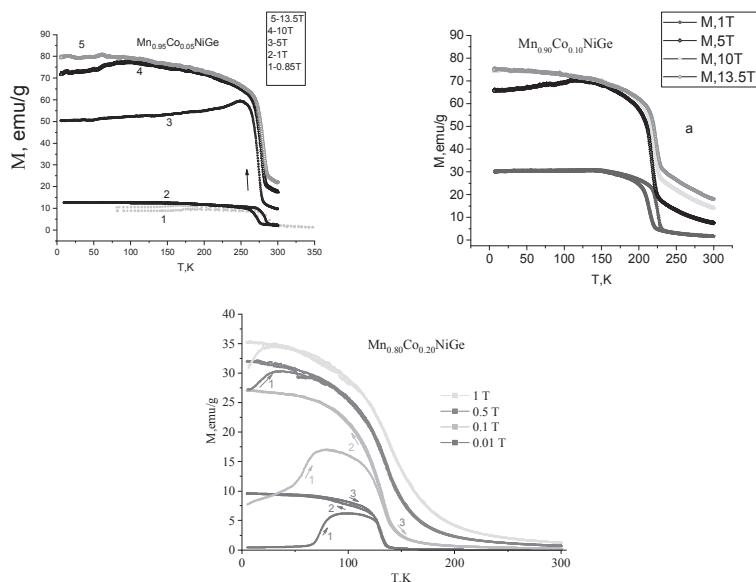


Рис. 3. Изменение характера переходов порядок-беспорядок при возрастании x

Теоретическое описание экспериментальных результатов проведено на основе модели Гейзенберга при использовании концепции мягкой моды для структурных переходов $P6_3/mmc(hex) \leftrightarrow Pnma(orth)$ [2; 3]. Для моделирования изменения спинового состояния при переходе от гексагональной к ромбической фазе использован туннельный подход, основанный на введение в гамльтониан Гейзенберга дополнительного члена, пропорционального ортогональной спиновой компоненте [3].



Исследование выполнено при финансовой поддержке БРФФИ и РФФИ в рамках научного проекта № T20P-204 и № 20-58-00059 соответственно.

- [1] E. K. Liu, H. G. Zhang, G. Z. Xu, X. M. Zhang, R. S. Ma, W. H. Wang, J. L. Chen, H. W. Zhang, G. H. Wu, L. Feng, and X. X. Zhang, Appl. Phys. Lett. **102**, 122405 (2013).
- [2] Вальков В. И., Головчан А. В., Коледов В. В., Тодрис Б. М., Митюк В. И. ФТТ, **62**, 710(2020).
- [3] Блинц Р., Жекш Б., Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики. Динамика решетки. М. : Мир, 1975.

Теплоемкость и магнитокалорический эффект в манганите $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0,02, 0,05, 0,10$)

А. Б. Гаджиев¹, А. Г. Гамзатов¹, А. М. Алиев¹,
S. Dwi Nanto², Budhy Kurniawan³, S. C. Yu⁴

¹ Институт Физики им. Х. И. Амирханова, ДФИЦ РАН,
Махачкала, 367015, Россия

² Syarif Hidayatullah States Islamic University, Jakarta 15412, Indonesia

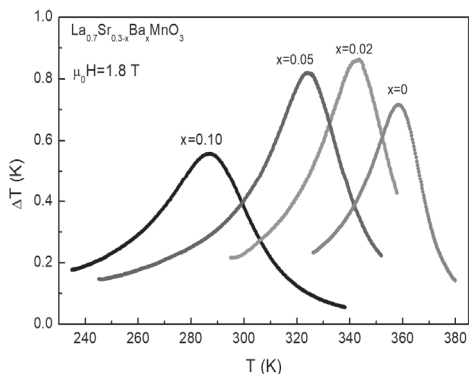
³ Physics department, Universities Indonesia, 15412, Indonesia

⁴ Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, 44919, South Korea.
mr.gadzhiev.93@mail.ru

В данной работе представлены результаты исследования теплоемкости и магнитокалорического эффекта в манганите $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3-x}\text{Ba}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0, 0,02, 0,05, 0,10$) в температурном интервале 80—400 К и в магнитном поле 1,8 Т. Частичное замещение Sr барием приводит к смещению T_C в сторону низких температур. Так, для образца $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,3}\text{MnO}_3$ ($x = 0$) $T_C = 362$ К, а для образца $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,2}\text{Ba}_{0,1}\text{MnO}_3$ ($x = 0,1$) $T_C = 280$ К, т. е. допирование приводит к смещению T_C на 82 К.

Прямые измерения адиабатического изменения температуры ΔT_{ad} приведены на рисунке. Максимальная величина прямого эффекта в поле 1.8 Т равна $\Delta T_{ad} = 0.86$ К и наблюдается для образца $\text{La}_{0,7}\text{Sr}_{0,28}\text{Ba}_{0,02}\text{MnO}_3$ при $T = 343$ К. Следует отметить, для образцов с $x = 0, 0,02$ и $0,05$ величина МКЭ слабо меняется с допированием, и

колеблется в пределах $\Delta T \sim 0,8$ К. При этом T_C смещается более чем на 40 К. Это означает, что путем регулирования уровня замещения можно управлять T_C в широкой области температур, при этом величина МКЭ остается практически неизменной, что является важным преимуществом для магнитокалорических материалов.



Температурная зависимость МКЭ для $La_{0,7}Sr_{0,3-x}Ba_xMnO_3$
($x = 0, 0,02, 0,05, 0,10$) в магнитном поле 1,8 Т

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 18-12-00415

- [1] A.B. Batdalov, A.G. Gamzatov, A.M. Aliev et al. Journal of Alloys and Compounds **782** (2019) 729—734.
- [2] A.G. Gamzatov, A.M. Aliev, P.D.H. Yen et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials **474** (2019) 477—481.
- [3] Алиев А. М., Батдалов А. Б., Калитка В. С. Письма в ЖЭТФ **90**, 736 (2009).



Изучение эффектов деградации магнитокалорического эффекта в системе $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{13,7}\text{Si}_{1,3}\text{-H}_d$ при долговременном воздействии циклических магнитных полей

А. Г. Гамзатов¹, А. М. Алиев¹, Н. Абдулкадирова¹,
Н. В. Zhou², J. Wang², Feng-xia Hu², В. С. Shen²

¹ Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия. gamzatov_adler@mail.ru

² State Key Laboratory of Magnetism, Institute of Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China

Несмотря на то что процесс создания твердотельных магнитных холодильников переходит в практическую плоскость (созданы и описаны десятки типов холодильных машин с разными характеристиками, с разными рабочими магнитными образцами, разной конструкцией и т. д. [1]), технология магнитного охлаждения столкнулась с множеством проблем, требующих дальнейших исследований. Как известно, созданные к настоящему времени прототипы магнитных холодильных машин работают на относительно низких частотах 4—10 Гц. Более того, одной из основных проблем, сдерживающих начало массового производства магнитных холодильников, является отсутствие экспериментальной базы для исследования свойств магнитных материалов в условиях длительного циклического воздействия магнитного поля. Кроме того, такие исследования представляют большой интерес с фундаментальной точки зрения. Изучение влияния циклического магнитного поля на магнитные и магнитокалорические свойства в настоящее время проводится отдельными группами в мире [2—4].

В данной работе представлены результаты исследования влияния частоты магнитного поля (до 20 Гц) и долговременного циклического воздействия магнитных полей (0,62, 1,8 и 8 Т) на магнитокалорические характеристики системы $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{13,7}\text{Si}_{1,3}\text{-H}_d$ [5].

На рис. 1 приведены температурные зависимости прямых измерений адиабатического изменения температуры (ΔT) в циклическом магнитном поле 1,8 Т в режиме нагрева для образцов $\text{La}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_{13,7}\text{Si}_{1,3}\text{-H}_d$ ($x = 0, 0,2$ и $0,3$; с водородом и без водорода). Как видим добавление водорода приводит к смещению максимума

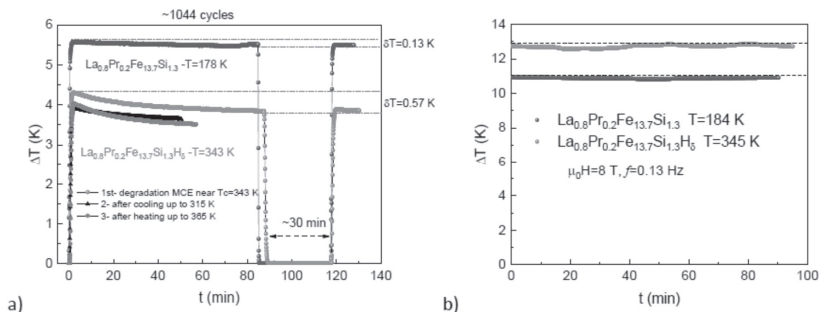


Рис.2. Временные зависимости ΔT для $La_{0,8}Pr_{0,2}Fe_{13,7}Si_{1,3}$ и $La_{0,8}Pr_{0,2}Fe_{13,7}Si_{1,3}H_0$ в циклических магнитных полях а) 1,8 T; б) 8 T

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 18-12-00415.

[1] B. Yu, M. Liu, et al, Inter. Journal of Refrigeration, **33**, 1029 (2010).
 [2] J. Döntgen, J. Rudolph, et al, Appl. Phys. Lett. **106**, 032408 (2015).
 [3] A.M. Aliev, A. B. Batdalov, et al, Appl. Phys. Lett. **109**, 202407 (2016).
 [4] Aliev, A. Batdalov, et al, J. Alloys Compd. **676**, 601 (2016).
 [5] Feng-xia Hu, Bao-gen Shen, et al, Appl. Phys. Lett. **78**, 3675 (2001).

Магнитокалорический эффект семейства сплавов $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$ в циклических магнитных полях

А. А. Мухучев¹, А. М. Алиев¹, А. А. Амиров¹, J. H. Belo²

¹ Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия

² IFIMUP, Physics Department of Science Faculty, Porto University,
Porto, Portugal. mukhuch87@mail.ru

Магнитокалорический эффект (МКЭ) представляет большой интерес, т. к. на его основе можно создать экологически безопасные и энергоэффективные охлаждающие системы. В настоящее время идут активные поиски как новых материалов с гигантским МКЭ, так и путей улучшения магнитокалорических свойств уже известных материалов. В рамках данной работы были проведены исследования МКЭ в циклических магнитных полях сплавов $Gd_5Si_{1,8}Ge_{2,2}$,

$Gd_5Si_2Ge_2$ и $Gd_5Si_{2,8}Ge_{1,2}$. Выбор циклических магнитных полей обусловлен тем, что все перспективные материалы необходимо исследовать в таких полях, т. е. в условиях, близких к тем, что будут в реальных магнитных холодильных машинах.

Исследование магнитокалорических свойств проводилось модуляционным методом в циклических магнитных полях с амплитудой $\Delta H = 0,5, 1, 2, 3, 6,2, 18, 40, 80$ кОе и в интервале температур от 180 К до 350 К. По данным температурной зависимости намагниченности в поле $H = 1$ кОе, температуры переходов в образцах $Gd_5Si_{1,8}Ge_{2,2}$, $Gd_5Si_2Ge_2$ и $Gd_5Si_{2,8}Ge_{1,2}$ равны 255, 275 и 315 К соответственно. Из данных по намагниченности в двух образцах хорошо проявляется тепловой гистерезис, а в $Gd_5Si_{2,8}Ge_{1,2}$ гистерезис не проявляется, из чего можно предположить, что в последнем мы имеем фазовый переход второго рода.

При исследовании данной серии все три образца показали большие значения МКЭ. Максимальное значение адиабатического изменения температуры было обнаружено у $Gd_5Si_2Ge_2$ ($\Delta T = 11,6$ К при $\Delta H = 80$ кОе) при $T = 292$ К.

Данные сплавы обладают не только большими значениями МКЭ по величине, но также данная величина сохраняется в широком интервале температур. Из полученных данных можно сделать вывод, что увеличение процентного содержания Si и соответственно уменьшение содержания Ge в сплаве приводит к смещению фазового перехода в сторону высоких температур. Из полученных результатов можно сделать вывод, что данные сплавы являются перспективными материалами для твердотельных холодильных устройств.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ
(грант № 18-12-00415)*

[1] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner, Phys. Lett. **78**, 4494 (1997).



Феноменологическое исследование температурного гистерезиса в сплавах Гейслера

М. А. Загребин, В. В. Соколовский, В. Д. Бучельников¹

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.
miczag@mail.ru

Ферромагнитные (ФМ) сплавы с памятью формы обладают рядом важных механических и магнитных свойств. Эти свойства связаны со связанным магнитоструктурным фазовым переходом из высокотемпературной фазы в низкотемпературную фазу в ФМ состоянии при охлаждении [1]. Очевидно, что в силу природы фазового перехода первого рода связанное магнитоструктурное превращение сопровождается температурным гистерезисом. Кроме того, ширина гистерезиса зависит от внутренних вкладов (связанных с электронной структурой, магнетизмом, химическим беспорядком и т. д.) и внешних влияний (связанных с микроструктурой) [1]. В данной работе основное внимание уделяется влиянию магнитного поля на структурные фазовые превращения и ширину гистерезиса в сплаве Гейслера $\text{Ni}_{2,16}\text{Mn}_{0,84}\text{Ga}$ в рамках теории структурных и магнитных фазовых переходов Ландау.

Рассмотрим кубический ферромагнетик в случае отсутствия модуляции кристаллической решетки. Свободная энергия в данном случае будет иметь следующий вид [2]:

$$F = \frac{1}{2}ae^2 + \frac{1}{3}be^3 + \frac{1}{4}ce^4 + \frac{1}{2}am^2 + \frac{1}{4}\delta m^4 + \frac{1}{2}B_0e^2m^2 + \frac{1}{2}Eem^2 - M_0Hm,$$

где $e = (2e_{zz} - e_{yy} - e_{xx})/\sqrt{6}$ — тетрагональные деформации, $m = M / M_0$ — безразмерная намагниченность, a , b и c — модули упругости 2-го, 3-го и 4-го порядков, α , δ — обменные постоянные, E , B_0 — анизотропная и объемная магнитоупругие постоянные; H — внешнее магнитное поле, M_0 — намагниченность насыщения. Параметры a и α линейно зависят от температуры и концентрации следующим образом: $a = a_0(T - T_m(x))$, $\alpha = \alpha_0(T - T_c(x))$ [1; 2].

Фазовая диаграмма сплава $\text{Ni}_{2,16}\text{Mn}_{0,84}\text{Ga}$ в координатах $(T-H)$, полученная в результате численных расчетов, представлена на рис. 1. На данной фазовой диаграмме видно, что фазовый переход 1 рода из ФМ кубической фазы в ФМ тетрагональную фазу имеет

точку окончания (T_{cr} , H_{cr}), соответствующую критической точке. Выше этой точки превращение аустенит-мартенсит реализуется путем фазового перехода 2 рода, который не сопровождается температурным гистерезисом. Критическая точка имеет следующие координаты: $T_{cr} = 324$ К, $H_{cr} = 30,1$ Тл. Зависимости намагниченности m и деформаций e от температуры при постоянных магнитных полях 0,05, 5, 14 и 30 Тл представлены на рис. 2. Видно, что гистерезис структурного фазового перехода исчезает во внешнем магнитном поле с величиной ≈ 30 Тл.

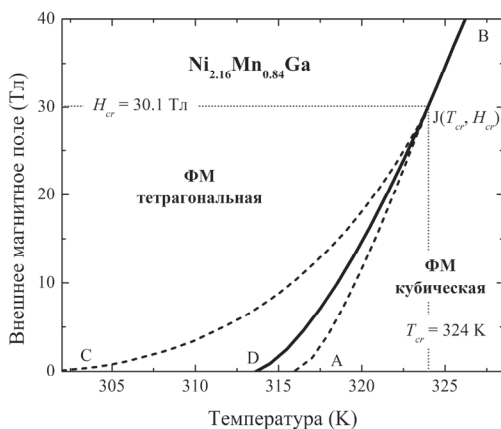


Рис. 1. (T – H) фазовая диаграмма сплава $Ni_{2,16}Mn_{0,84}Ga$.

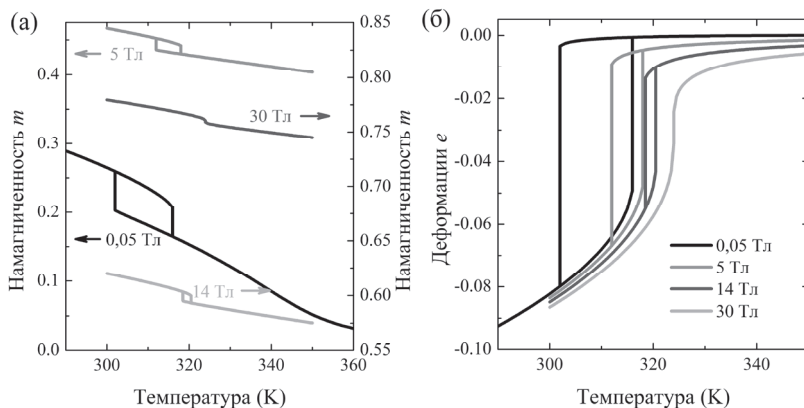


Рис. 2. Температурная зависимость (а) намагниченности и (б) тетрагональных деформаций сплава $Ni_{2,16}Mn_{0,84}Ga$ во внешнем магнитном поле 0,05, 5, 14 и 30 Тл



Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-72-20022.

- [1] P. Entel, V.D. Buchelnikov, V.V. Khovailo et al., J. Phys. D Appl. Phys. **39**, 865 (2006).
[2] V.D. Buchelnikov, S.V. Taskaev, M.A. Zagrebin et al., J. Magn. Magn. Mater. **313**, 312 (2007).

Магнитокалорический эффект и намагниченность гадолиния в стационарных и импульсных магнитных полях до 40 кЭ

А. П. Каманцев¹, В. В. Коледов¹, В. Г. Шавров¹, Л. Н. Бутвина²,
А. В. Головчан³, Б. М. Тодрис³, В. И. Вальков³, С. В. Таскаев^{4,5}

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия. *kaman4@gmail.com*

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

³ Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, Донецк, ДНР

⁴ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

⁵ Южно-уральский государственный университет (НИУ), Челябинск, Россия

Цель настоящей работы — отработка новых экспериментальных методов изучения магнитных и функциональных свойств материалов в широком диапазоне температур в условиях сильных быстроизменяющихся и импульсных магнитных полей на примере классического материала — металлического Gd. Температурные зависимости намагниченности образца Gd в интервале температур 25—350 К в магнитных полях от 1 до 30 кЭ с шагом 1 кЭ получены с помощью вибрационного магнитометра QD-VersaLab и представлены на рис. 1. На кривые намагниченности нанесены результаты одновременных измерений намагниченности и магнитокалорического эффекта (МКЭ) в квазистационарном (пунктирные линии) и в импульсном (сплошные линии) магнитных полях. В первом случае поле биттеровского магнита менялось со скоростью всего 2 кЭ/сек, и образец Gd успевал часть теплоты от МКЭ передать окружаю-

щей среде. В следствие чего красная пунктирная кривая на рис. 1 (поле до 27 кЭ) заканчивается на 1 К ниже начальной температуры. Намагниченность в данном эксперименте измерялась с помощью датчиков Холла, а температура — с помощью терморезистора [1].

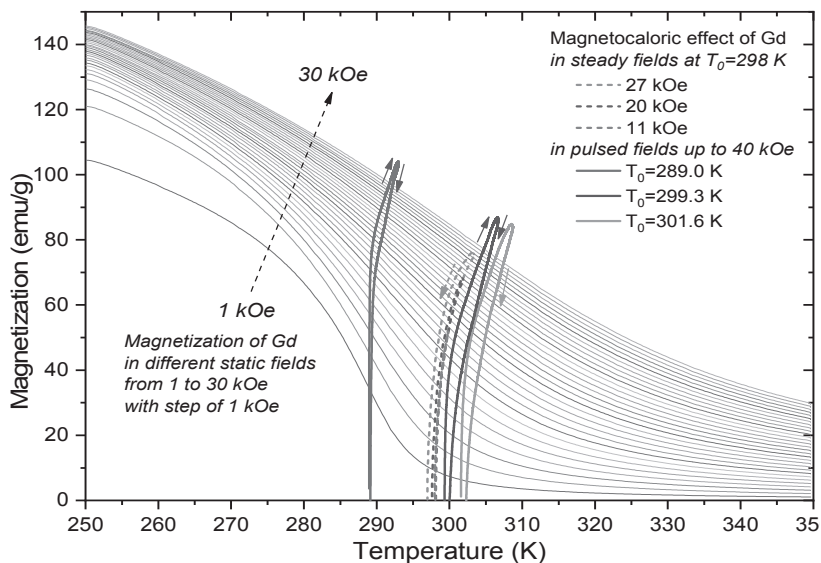


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности образца Gd в интервале температур 250—350 К в магнитных полях от 1 до 30 кЭ с шагом 1 кЭ. На кривые намагниченности нанесены результаты одновременных измерений намагниченности и МКЭ в медленноменяющемся (2 кЭ/сек) и импульсном (10 МЭ/сек) магнитных полях

Большой экспериментальной проблемой является точное измерение температуры вещества в импульсных полях в условиях сильных электромагнитных помех. В работе использован новый метод бесконтактного измерения температуры на основе волоконно-оптического датчика (ВОД) [2]. Новая система на основе оптического волокна среднего ИК-диапазона (5—15 мкм) из $\text{AgCl}_x\text{Br}_{1-x}$ ($0 < x < 1$) [3] с фотоприёмником из Cd-Hg-Te (охлаждаемым жидким азотом) хорошо защищена от влияния электромагнитных помех и обладает высоким быстродействием (~1 мкс). ВОД температуры использовался для проведения экспериментов по измерению МКЭ в импульсных магнитных полях до 40 кЭ, при этом намагниченность образцов измерялась индукционным методом (рис. 2а,б). Можно заметить, что конечная температура образца Gd в импульсных



экспериментах на 0,5 К выше начальной (рис. 2b), что может объясняться его разогревом токами Фуко, возникающими на поверхности образца в быстроизменяющемся магнитном поле (~10 МЭ/сек).

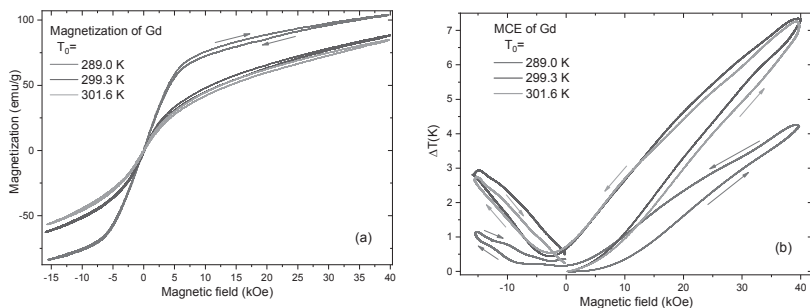


Рис. 2. Полевые зависимости (a) намагниченности и (b) МКЭ образца Gd при разных начальных температурах в импульсном магнитном поле до 40 кЭ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 18-42-06201.

- [1] E. T. Dilmieva et al., *Physics of the Solid State* **58**, 1, 81 (2016).
 [2] A.P. Kamantsev et al., *J. Magn. Magn. Mater.* **440**, 70 (2017).
 [3] L.N. Butvina et al., *Optics letters* **32**, 4, 334 (2007).

Магнитокалорический эффект и намагниченность композитного MnAs в импульсных магнитных полях до 40 кЭ

А. П. Каманцев¹, В. В. Коледов¹, В. Г. Шавров¹, Л. Н. Бутвина²,
 А. В. Головчан³, Б. М. Тодрис³, А. П. Сиваченко³, В. И. Вальков³,
 А. В. Кошелев⁴, Г. А. Шандрюк⁵

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия. kaman4@gmail.com

² Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

³ Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина, Донецк, ДНР

⁴ Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева РАН, Москва, Россия

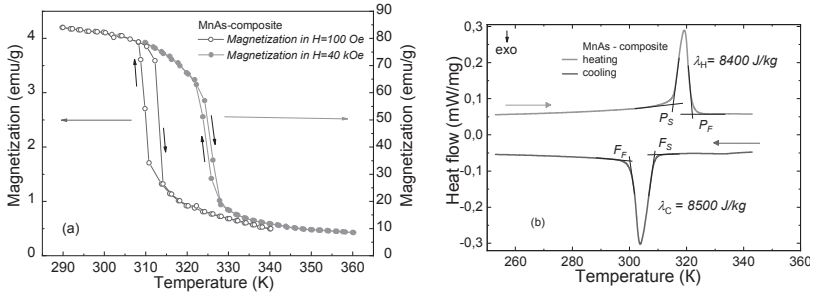


Рис. 1. а) Зависимость намагниченности композитного образца MnAs от температуры в магнитных полях 100 Э и 40 кЭ; б) Результаты ДСК композитного образца MnAs, скорость прохода 5 К/мин

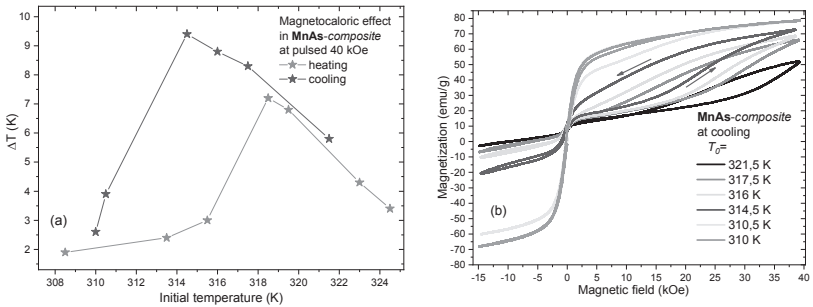


Рисунок 2. а) Зависимость МКЭ композитного образца MnAs от температуры в магнитном поле 40 кЭ при последовательном нагреве и охлаждении; б) Зависимость намагниченности композитного образца MnAs от магнитного поля при разных начальных температурах при охлаждении

Проведённые в сильных импульсных магнитных полях эксперименты показывают, что композитные образцы MnAs обладают достаточной механической стабильностью и величиной МКЭ, поэтому применимы для технологии магнитного охлаждения при комнатной температуре.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 20-19-00745.

[1] A.P. Kamantsev et al., J. Magn. Magn. Mater. **440**, 70 (2017).
 [2] Y.S. Koshkid'ko, et al., Journal of Alloys and Compounds **798**, 810 (2019).

Механический тепловой ключ для холодильной машины с МКЭ

К. А. Колесов¹, А. В. Маширов², В. В. Коледов²,
О. В. Белова¹, Д. А. Калинин¹, С. В. Горюнов¹, А. П. Каманцев²,
А. О. Петров², В. Г. Шавров²

¹ Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия. *kolesovkka@mail.ru*

² Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва, Россия. *iiivanov@mail.ru*

Одним из важнейших стимулов к поиску альтернативных систем криогенного охлаждения является стремление приблизиться к фундаментальному пределу эффективности процесса охлаждения, установленному теоремой Карно. Высказана гипотеза о том, что только лишенная принципиальных ограничений, свойственных газообразным системам, тепловая машина на основе магнитокалорического эффекта (МКЭ) способна реально приблизиться к машине Карно по эффективности. Поэтому практическая реализация магнитокалорических охлаждающих систем, достаточно близких к идеальному циклу Карно представляет большой интерес.

На сегодняшний день магнитокалорические свойства большинства перспективных материалов с МКЭ хорошо изучены, но остальные элементы будущих систем, например тепловые ключи, обеспечивающие контролируемую передачу тепла от холодного резервуара к магнитокалорическому рабочему телу и далее к горячему резервуару изучены недостаточно. В данной работе теоретически исследуется передача тепла в механическом тепловом ключе, когда рабочее тело из сплава с МКЭ, например, $DyNi_2$ при адиабатическом намагничивании или размагничивании может быть источником тепла или теплоприемником, соответственно. Исследуемый теоретически тепловой ключ планируется применить в прототипе магнитного холодильника в диапазоне рабочих температурах 20—77 К [1].

Для осуществления термического контакта в тепловом ключе контактируют диск из интерметаллического соединения $DyNi_2$ и диск из отожженной меди (см. рис. 1). Эти диски закрепляются стеклотекстолитовым держателем по периферии. При помощи актюатора рабочее тело в виде диска $DyNi_2$ адиабатически вводится и выводится возвратно-поступательным движением в магнитное поле

1—10 Тл сверхпроводящего магнита. Для оценки адиабатичности при закреплении стеклотекстолитовым держателем использовали численный эксперимент. Также путем численного эксперимента исследовалось количество теплоты, передаваемое от рабочего тела DyNi_2 к медным дискам теплового ключа.

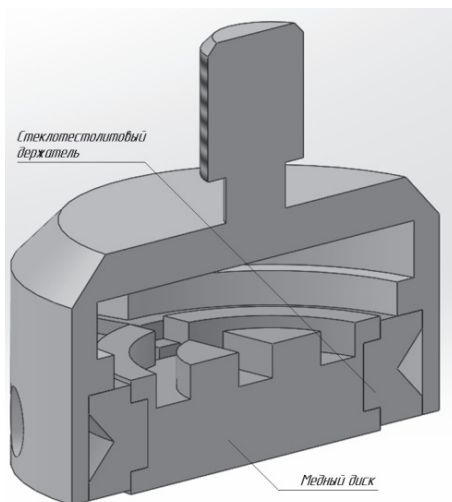


Рис. 1. Вид в разрезе крепления рабочего тела со стеклотекстолитовым держателем к штоку актюатора магнито-калорического холодильника

На рис. 2 показан пример рассчитанного теплового поля в ключе. В результате проведенного расчета были получены данные о значении времени, необходимого для передачи теплоты от рабочего тела с МКЭ в сплаве DyNi_2 в медный диск механического теплового ключа (0,065 с). На основании результатов численного моделирования теплового ключа с учетом данных о тепловых и магнитокалорических свойствах рабочего тела возможен расчет всех основных параметров каскада магнитного охлаждения: тепловой мощности, достигаемой разности температур, потребляемой мощности и коэффициента идеальности процесса по отношению к циклу Карно.

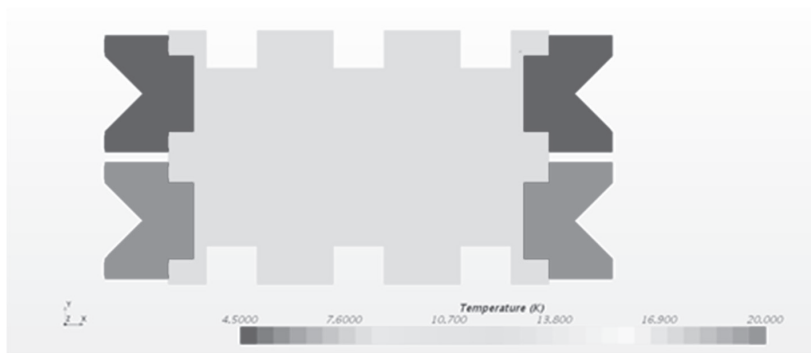


Рис. 2 Поле распределения температур в рабочем теле, выполненном из редкоземельного сплава $DyNi_2$ и медном диске после установления теплового контакта

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10197).

- [1] A.V. Mashirov, V.V. Koledov, A.P. Kamantsev, et al., Thermodynamic parameters of a magnetic refrigerator with a Carnot cycle // Thermag 2018; 16—20 September 2018 At: Darmstadt; Germany.

Магнитокалорические материалы для низкотемпературного магнитного охлаждения

Ю. С. Кошкидько^{1,2}, Э. Т. Дильмиева², А. П. Каманцев²,
А. В. Маширов², Я. Цвик¹, Н. Б. Кольчугина³,
В. В. Коледов², В. Г. Шавров²

¹ Institute of Low Temperature and Structure Research of PAS,
50-422 Wrocław, Poland. y.koshkidko@intibs.pl

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия

³ Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН,
Москва, Россия

Перспективная идея магнитного охлаждения путем адиабатического размагничивания принесла в начале 30-х гг. XX века в физику низких температур новые возможности получения

сверхнизких температур до 10^{-3} К [1]. Преимущества магнитных материалов при охлаждении в области низких температур связаны с тем, что магнитная теплоемкость сопоставима, а иногда и превышает теплоемкость решетки твердого тела. Большой интерес исследователей на сегодняшний день связан с поиском подходов к созданию принципиально новой, твердотельной технологией магнитного охлаждения на основе магнитокалорического эффекта (МКЭ). Хотя большинство работ пока посвящено разработке магнитного охлаждения в области комнатных температур, самый последний тренд связан с перспективами твердотельного магнитного охлаждения в области низких температур [2], например для сжижения газов, таких как жидкий гелий, водород и др. Известно, что МКЭ достигает максимальных значений в области магнитных фазовых переходов (ФП) [1—3]. Поэтому для технологии магнитного охлаждения выбираются материалы, которые обладают магнитными ФП в области рабочих температур магнитного рефрижератора. Также немаловажным является значение теплопроводности таких материалов, которая в значительной степени влияет на частоту циклов работы магнитных холодильников. С этой точки зрения наиболее перспективными материалами для области низких температур могут являться редкоземельные металлы и интерметаллические соединения, которые имеют высокие значения теплопроводности и имеют сильную намагниченность насыщения и магнитные ФП в области низких температур.

В работе приводится обзор современного состояния исследований в области изучения материалов с МКЭ на основе РЗМ и интерметаллических соединений для низкотемпературного магнитного охлаждения. Обсуждаются перспективы и возможность применения этих материалов для магнитного охлаждения в области низких температур.

Работа выполнена при финансировании РНФ, грант № 20-79-10197.

[1] Giaque W. F., J. Am. Chem. Soc. **49**, 1864 (1927).

[2] Zimm C.B., Ratzmann P.M., et al. Adv. Cryog. Eng. **36** (1990) 763.

[3] Nikitin S.A., et al. Phys. Met. Metallogr. **60** (1985) 56.



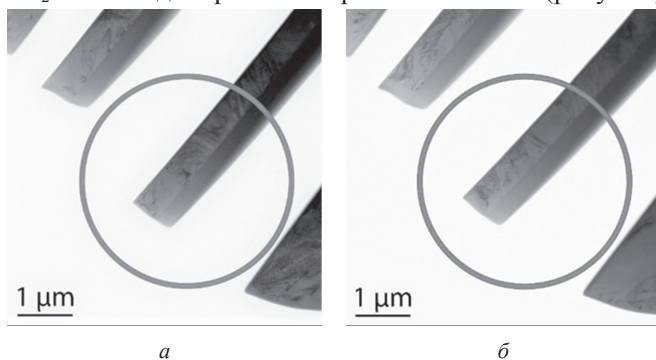
Фазовые превращения и гигантские эффекты в мультифункциональных материалах на наномасштабе

П. В. Лега, А. П. Орлов, В. В. Коледов, В. Г. Шавров

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия. lega_peter@list.ru

Важной фундаментальной проблемой физики конденсированного состояния является изучение особенностей физических свойств различных материалов на наноуровне размеров. Глубокое понимание размерных эффектов необходимо при изучении мультифункциональных твердотельных материалов с фазовыми переходами и гигантскими эффектами, такими, как магнитокалорический, эластокалорический, эффект памяти формы (ЭПФ). Целью настоящей работы является экспериментальное исследование особенностей проявления термоупругого мартенситного перехода и сопутствующего ему ЭПФ в сплаве Ti_2NiCu на наномасштабе размеров.

Использована новая схема для экспериментального изучения проявления термоупругого мартенситного ФП и ЭПФ на наномасштабе размеров на основе слоистого композитного материала [1]. Впервые *In situ* в ПЭМ изучено формирование фазового равновесия в нанообразцах аморфно-кристаллических композитов на основе сплава Ti_2NiCu и одновременно проявления ЭПФ (рисунок, а и б).



In situ исследование мартенситной структуры
и изменения формы наноактюаторов с ПЭМ при термоциклировании
через температуру термоупругого ФП (а) наноактюатор при температуре
ниже точки ФП, (б) то же при температуре выше точки ФП.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФ № 17-19-01748.

[1]. Lega P., et al. *Advanced Engineering Materials*. — 2017. V 19 (8), 1700154.

Структурные, магнитные и магнитокалорические свойства в сплавах Fe-Ga

М. В. Матюнина¹, В. В. Соколовский¹,
М. А. Загребин¹, В. Д. Бучельников¹

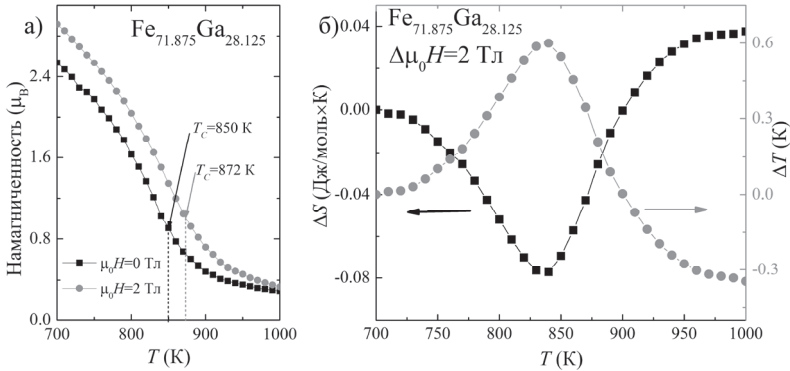
¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.
matunins.fam@mail.ru

Сплавы Fe-Ga являются успешными магнитоотрицательными материалами, представляющими интерес в технике в качестве датчиков, магнитоотрицательных приводов в микроэлектромеханических системах и сенсорных устройствах. Для данных сплавов характерно наличие двух пиков магнитоотрицательности насыщения λ_{100} — 395×10^{-6} и 350×10^{-6} при концентрации Ga $x = 19$ и 27 % соответственно [1]. Минимум величины магнитоотрицательности достигается при содержании Ga около 25 ат. %. Несмотря на имеющиеся теоретические исследования, гораздо меньше информации о моделировании магнитных свойств сплавов Fe-Ga при конечных температурах. Настоящая работа направлена на комплексное исследование структурных, магнитных и магнитокалорических свойств $Fe_{100-x}Ga_x$ при помощи *ab initio* расчетов при нулевой температуре и моделирования методом Монте-Карло (МК) при конечных температурах.

Исследование проведено для кубических кристаллических структур $D0_3$ и $L1_2$ сплавов $Fe_{100-x}Ga_x$ в области содержания Ga $x = 25$ и $28,125$ ат. %, соответствующих минимуму и второму максимуму магнитоотрицательности. При помощи *ab initio* программного пакета VASP [2, 3] и метода моделирования суперъячеек были определены равновесные параметры решеток $D0_3$ ($Fm\bar{3}m$, 225 группа симметрии) и $L1_2$ ($Pm\bar{3}m$, 221 группа симметрии) и энергии основного состояния. Структурная оптимизация выполнялась с использованием обменно-корреляционного потенциала в рамках приближения обобщенного градиента в формулировке Perdew-Burke-Ernzerhof [4]. Для оптимизированных параметров решёток $D0_3$ и $L1_2$ были рассчитаны

параметры обменного взаимодействия J_{ij} при помощи программного пакета SPR-KKR [5] в приближении локальной плотности в формулировке Vosko-Wilk-Nusair [6]. Константы обменного магнитного взаимодействия Гейзенберга рассчитывались с использованием выражения, предложенного Лихтенштейном и др. [7]. Температурные зависимости намагниченности и расчет термодинамических характеристик исследуемых структур сплава Fe-Ga был проведен методом МК моделирования трехмерной модели Гейзенберга в отсутствие анизотропии $H_{mag} = -\sum_{\langle ij \rangle} J_{ij} \mathbf{S}_i \mathbf{S}_j$, где \mathbf{S}_i — спин единичной длины ($|\mathbf{S}_i| = 1$), помещенный на узле решетки, J_{ij} — параметры обменного взаимодействия, полученные из первопринципных расчетов. Моделирование МК проводилось с использованием алгоритма Метрополиса [8]. Модельные решетки с периодическими граничными условиями для фаз $D0_3/L1_2$ задавались 2826/3300 атомов Fe и 1099/1331 атомов Ga соответственно [9].

На рисунке (а) представлена температурная зависимость намагниченности во внешних полях 0 и 2 Тл. Из рисунка видно, что магнитное поле смещает температуру Кюри на 22 К. Изменение энтропии ΔS кристаллической структуры $D0_3$ сплава $Fe_{71,875}Ga_{28,125}$ (рисунок, б) при изменении напряженности внешнего магнитного поля на 2 Тл составило — 0.077 Дж/моль \times К при этом наблюдается прямой магнитокалорический эффект величина которого составляет 0,6 К.



Температурная зависимость (а) намагниченности и (б) изменения энтропии и температуры кристаллической структуры $D0_3$ сплава $Fe_{71,875}Ga_{28,125}$ в магнитном поле 0 и 2 Тл

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 17-72-20022.

- [1] A.E. Clark et al., Jpn. J. Appl. Phys. **93**, 8621 (2003).
 [2] G. Kresse, J. Furthmüller, Phys. Rev. B **54**, 11169 (1996).
 [3] G. Kresse, D. Joubert, Phys. Rev. B **59**, 1758 (1999).
 [4] J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof, Phys. Rev. Lett., **77**, 18 3865 (1996).
 [5] H. Ebert, D. Koedderitzsch, J. Minar, Rep. Prog. Phys., **74**, 96501 (2011).
 [6] S.H. Vosko, L.Wilk, M. Nusair, Canadian J. of Phys., **58**, 1200 (1980).
 [7] A.I. Liechtenstein et al., J. Magn. Magn. Mater., **67**, 65 (1987).
 [8] D.P. Landau, K. Binder, A. Guide to Monte Carlo Simulations in Statistical Physics, Cambridge, 2009.
 [9] M.V. Matyunina et al., J. Magn. Magn. Mater., **470**, 118 (2019).

Моделирование калорических эффектов в сплавах Гейслера

А. С. Метлов^{1,2}, В. В. Коледов³, В. Г. Шавров³, Е. В. Морозов³,
Ю. В.Техтелев^{1,4}, С. В. Таскаев⁵

¹ Донецкий физико-технический институт, Донецк, Украина

² Донецкий Национальный Университет, Донецк, Украина.

lsmet@donfti.ru

³ Институт радиотехники и электроники РАН, Москва, Россия

⁴ Луганский национальный университет Т. Г. Шевченко,

Луганск, Украина

⁵ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

Материалы с кубической симметрией, такие как никелид титана TiNi, сплавы Гейслера и т. д. представляют важный класс перспективных конструкционных и функциональных материалов, обладающих эффектом памяти формы, с широким спектром полезных свойств. Для моделирования эластокалорического эффекта в области мартенситного перехода рассмотрим сплавы типа Гейслера. Выражение для структурной части свободной энергии такого сплава [1] при наличии поляризующей внешней периодической растягивающей силы амплитуды A и частоты ω может быть записано в простом виде

$$\Phi = \Phi_0 + \frac{1}{2}ae_3^2 + \frac{1}{3}be_3^3 + \frac{1}{4}ce_3^4 - Ae_3(1 - \cos(\omega t)), \quad (1)$$

где e_3 — некоторая линейная комбинация компонентов тензора деформации [1]

$$e_3 = (2e_{zz} - e_{xx} - e_{yy})/\sqrt{6}. \quad (2)$$

Согласно наиболее распространенному варианту теории Ландау, температурная зависимость осуществляется через коэффициент при второй степени структурного параметра порядка (ПП) в форме

$$a = a_0(T - T_M), \quad (3)$$

где a_0 — некоторая новая постоянная, T_M — критическая температура мартенситного перехода.

Для описания кинетики фазового перехода с учетом движения доменных границ (неоднородная задача) используются уравнения типа Гинзбурга — Ландау

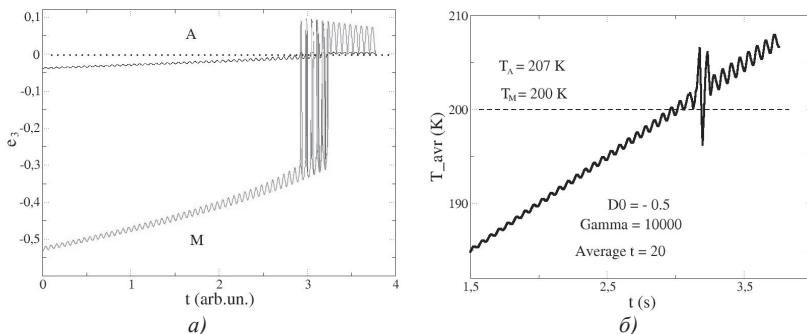
$$D \frac{\partial e_3}{\partial x} - \gamma \frac{\partial \phi}{\partial e_3}, \quad (4)$$

где D — коэффициент «диффузии» ПП, γ — кинетический коэффициент.

Решая последнее уравнение конечноразностным методом для 1D цепочки из 1000 элементов, легко рассчитать эволюцию параметра порядка e_3 . При постоянном росте температуры со скоростью 0.00001 K/s и в условиях действия растягивающего напряжения с параметрами $A = 0,002$ усл. ед., $\omega = 0,1$ усл. ед., она приведена на рисунке, а. На рисунке изображены графики для 1, 100, 200, ..., 1000 элементов цепочки с шагом 100 элементов. Из него видно, при подходе к критическому интервалу температур (см. рисунок, б) под действием периодического растягивающего напряжения материал поочередно переходит из мартенситного состояния (М) в аустенитное состояние (А) и обратно.

Адиабатическое изменение температуры (рисунок, б) будем определять в соответствии теорией эластокалорического эффекта для фазового перехода 1-го рода [6]. Для адиабатической температуры в рассматриваемом интервале имеется разрастание амплитуды колебаний (рисунок, б) типичное для ЭКЭ, наблюдаемое в эксперименте [7].





Эволюция ПП и адиабатической температуры в процессе нагревания при наличии периодической растягивающей силы

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 18-42-06201.

- [1] A.N. Vasil'ev, A.D. Bozhko, V.V. Khovailo, I.E. Dikshtein, V.G. Shavrov, V.D. Buchelnikov, M. Matsumoto, S. Suzuki, T. Takagi, J. Tani, Phys. Rev. B, 59, 1113 (1999).
- [2] С. А. Никитин, Вестник Московского университета. 3. Физика, астрономия 6, 27 (2011).
- [3] Е. В. Морозов, С. Ю. Федотов, А. В. Петров, М. С. Быбик, Т. А. Кули-заде, И. А. Знаменская, В. В. Коледов, В. Г. Шавров, ФТТ 62, 6, 864 (2020).

Влияние микроструктуры на магнитокалорический эффект в сплаве $Ni_{2,16}Mn_{0,78}Ga_{0,98}Si_{0,07}$

И. И. Мусабилов¹, И. М. Сафаров¹, Р. М. Галеев¹, Р. Ю. Гайфуллин²,
А. Б. Гаджиев³, А. М. Алиев³, В. В. Коледов⁴, Р. Р. Мулюков¹

¹ Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, Уфа, Россия

² Башкирский государственный университет, Уфа, Россия

³ Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия

⁴ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия

Сплавы Гейслера привлекают внимание благодаря наличию в них таких уникальных эффектов как ферромагнитный эффект па-

мяти формы и магнитокалорический эффект. В монокристаллических образцах величины эффектов гораздо больше по сравнению с поликристаллическими образцами. Однако изготовление монокристаллического сплава достаточно трудоемкий процесс и имеет ряд недостатков. Поэтому получение значительных величин функциональных эффектов на поликристаллических образцах является актуальной задачей исследования данных материалов. Также, при многократных циклах мартенситного превращения сплавы подвержены разрушению. Для решения данной проблемы к сплавам данной системы возможно применение различных методов деформационно-термической обработки (ДТО). В результате ДТО в материале происходит трансформация микроструктуры, что может повлиять на функциональные эффекты.

В данной работе представлены результаты исследования магнитокалорического эффекта в поликристаллическом сплаве $\text{Ni}_{2,16}\text{Mn}_{0,78}\text{Ga}_{0,98}\text{Si}_{0,07}$ в двух структурных состояниях — исходном литом и после ДТО методомковки. После выплавки сплава аргоно-дуговой плавкой из элементов Ni, Mn и Ga высокой чистоты, слиток был подвергнут вакуумной переплавке для получения заготовки пригодной для дальнейшей ДТО. В результатековки при $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 6 переходовосадки на 15—35 % в материале была сформирована бимодальная микроструктура. В ней исходные крупные зерна размером порядка 100 мкм окружены прослойкой мелкозернистой структуры, сформированной в результате динамической рекристаллизации при деформации. Анализ температур мартенситного превращения методом дилатометрии показывает, что в результате обработки наблюдается снижение температуры превращения на величину около $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализ МКЭ показывает, что его величина в сплаве в исходном литом и деформированном состоянии одинакова. Таким образом, в результате ДТО в сплаве не наблюдается деградации величины функционального эффекта. При этом наличие двухкомпонентной микроструктуры должно повысить механические свойства материала.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-79-10197).



Захват магнитного потока в образце керамики ВТСП $YBa_2Cu_3O_7$ и его частичное разрушение

А. О. Петров¹, А. В. Маширов¹, В. В. Коледов¹, А. П. Каманцев¹,
К. А. Колесов², В. Г. Шавров¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Москва, Россия. alexandrpetrov291094@gmail.com

² Московский государственный технический университет имени Н.Е. Баумана

Создание твердотельных криогенных систем нового поколения требует разработки источников сильных магнитных полей, превышающих по напряженности постоянные магниты. Наилучшим кандидатом для таких систем являются сверхпроводящие постоянные магниты, выполненные из лент или объемных керамических элементов из ВТСП, в частности $YBa_2Cu_3O_7$.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процесса захвата магнитного потока, измерение скорости релаксации магнитной индукции при захвате потока и изучение сопутствующих релаксации эффектов в твердотельном сверхпроводящем керамическом материале с ВТСП. Эксперимент проводился на основе криомагнитной системы с магнитным полем 10 Тл и рефрижератором на цикле Гиффорда — Макмагона с шахтой переменных температур в интервале 2—320 К с терморегулятором LakeShore 336. Исследовались цилиндрические образцы высокотемпературной сверхпроводящей керамики $YBa_2Cu_3O_7$. Магнитное поле измерялось как в зазоре между цилиндрами, так вне его (см. рис. 1). В результате удалось захватить магнитный поток 5 и 10 Т, но в течение часа, захваченный магнитный поток в 10 Т не сохранялся и изменял своё значение до 2 — 3 Т, а также образец разрушался, как показано на рис. 2.

Однако эксперимент, в котором магнитный поток равен 5 Т, сохранил захваченное значение без разрушения образца и сохранял его на протяжении длительного времени (рис. 1а). Для захвата магнитного поля 10 Тл при температуре 30 К были использованы образцы без видимых дефектов. Предварительно магнитное поле 10 Тл вводилось внешним сверхпроводящим магнитом между двумя образцами после охлаждения их до температуры 30 К (рис. 1б). Здесь видно, что захваченное магнитное поле при линейном

уменьшении тока 1 А/м , что соответствует уменьшению внешне-го приложенного магнитного поля $0,075 \text{ Тл/м}$ сохраняет значение 10 Тл при снижении внешнего магнитного поля примерно до значения $7,75 \text{ Тл}$. При значении внешнего поля 9 и $8,4 \text{ Тл}$ наблюдался первый и второй температурный скачок датчика держателя на $0,4 \text{ К}$ и $3,2 \text{ К}$, соответственно, что можно объяснить нагреванием двух образцов YBCO за счет понижения внешнего магнитного поля. Данное поведение в уменьшающемся внешнем магнитном поле ВТСП-таблетки известно из работы [1—3], где было замечено также изменение температуры сверхпроводника, находящегося в сверхпроводящем состоянии в момент изменения магнитного поля.

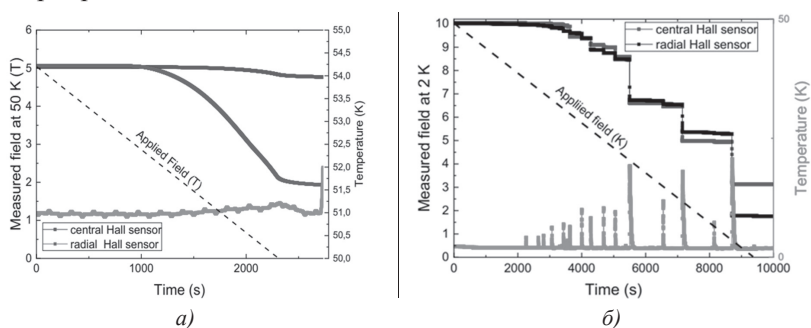


Рис. 1. Эксперименты по захвату магнитного потока в образцах ВТСП керамики.

а) График временной зависимости захваченного магнитного потока в зазоре между цилиндрическими образцами ВТСП керамики в поле 5 Тл при 30 К и при расстоянии между образцами 4 мм ;
б) То же в поле 10 Тл

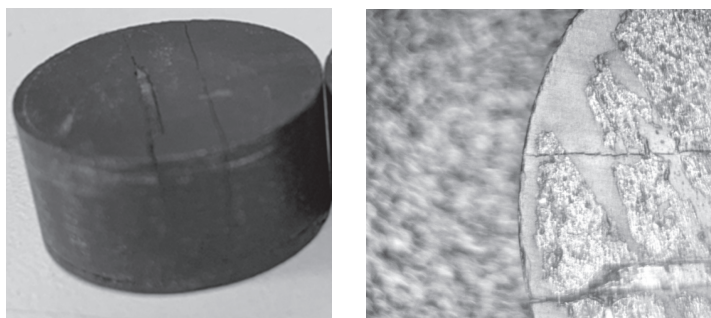
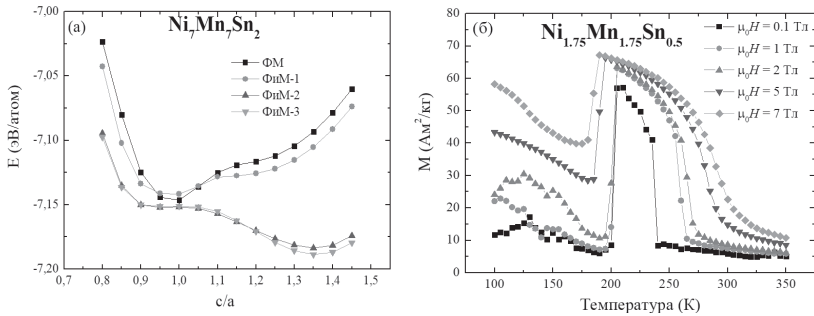


Рис. 2. Эффект разрушения образца керамики ВТСП, сопровождающий релаксацию магнитного потока при снижении внешнего магнитного поля



Полученные результаты находятся в хорошем согласии с имеющимися экспериментальными данными.



а) Зависимость энергии сплава $Ni_7Mn_7Sn_2$ с прямой гейслеровской структурой от тетрагонального искажения с учетом различного магнитного упорядочения (ФМ-1: μ_{Mn} в позиции Ni — \downarrow , ФМ-2: μ_{Mn} в позиции Sn — \downarrow , ФМ-3: μ_{Mn} в позициях Ni и Sn — \downarrow ; μ_{Mn} в позиции Mn — \uparrow);
 б) Температурная зависимость намагниченности в различных магнитных полях

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 17-72-20022.
 Первопринципные вычисления для обратной решётки выполнены за счет гранта РФФИ № 18-08-01434.

[1] Y. Sutou, Y. Imano, N. Koeda et al., Appl. Phys. Lett. **85**, 4358 (2004).
 [2] G. Kresse and J. Furthmüller, Phys. Rev. B **54**, 11169 (1996).
 [3] H. Ebert, D. Ködderitzsch, and J. Minár, Rep. Prog. Phys. **74**, 096501 (2011).
 [4] V. V. Sokolovskiy, P. Entel, V. D. Buchelnikov et al., Phys. Rev. B **91**, 220409(R) (2015).

Сравнение циклов криогенного охлаждения на основе газообразного рабочего тела и твердотельных магнитных материалов с фазовыми переходами

Д. А. Суслов¹, В. Г. Шавров¹, В. В. Коледов¹, А. В. Маширов¹,
Ю. А. Терентьев, А. Петров¹, А. П. Каманцев¹,
А. В. Самвелов², С. Г. Ясев², С. В. Таскаев³

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия. victor_koledov@mail.ru

² АО «Оптико-механическое конструкторское бюро АСТРОН»,
Москва, Россия

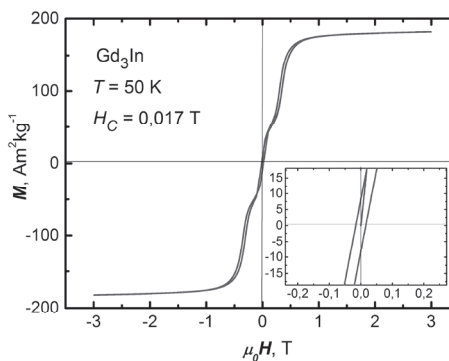
³ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

В последние годы прогресс во многих областях техники связывают с внедрением революционных физических принципов, основанных на достижениях квантовой механики, например, в компьютерной технологии, информатике и даже на транспорте [1; 2]. Как эти, так многие другие прорывные технологии в медицинской диагностике, фотонике и др. для широкого внедрения требуют принципиально новых систем криогенного охлаждения, миниатюрных, экономичных, эффективных. Наиболее эффективным циклом охлаждения является обратимый цикл Карно, состоящий из изоэнтропийных циклов сжатия и расширения и изотермического обмена теплом на холодном и горячем тепловых выходах. Более вероятно, что цикл с эффективностью, приближающейся к идеальному циклу Карно будет реализован лишь в твердотельных, например, магнитных рефрижераторах. В современных криокулерах используют цикл Стирлинга или Эриксона. В них вместо изоэнтропийного процесса используются либо изохорический (Стирлинг), либо изобарический (Эриксон) процессы, теоретически имеющие ту же эффективность, что и цикл Карно. Однако при их реализации имеет место обмен энергией с окружением. Поглощающееся на этапе расширения тепло в идеальном случае полностью выделяется в процессе сжатия. Поэтому составной частью таких машин является регенератор, т. е. устройство аккумулирующее и отдающее тепло в течении каждого цикла. От регенератора зависит КПД устройства, которое реально составляет не более 20 % от эффективности цикла Карно. В докладе обсуждаются и сравниваются известные

сколько лет были тщательно изучены материалы с большим МКЭ на предмет их потенциального применения для технологии магнитного охлаждения. Ожидается, что технология магнитного охлаждения является многообещающей технологией, работающей в широком диапазоне температур: от сверхнизких до комнатных температур.

Для практического применения необходимо использовать материалы с большой величиной МКЭ при относительно небольшом изменении магнитного поля. К потенциальным кандидатам можно отнести материалы с фазовым переходом первого рода — например, $Gd_5Si_2Ge_2$, $ErCo_2$, $LaFe_{13-x}Si_x$, $MnAs_{1-x}Sb_x$, сплавы Гейслера, демонстрирующие гигантский МКЭ вблизи температуры фазового перехода [2—10]. Однако у таких материалов есть существенные недостатки — узкий диапазон рабочих температур, а также наличие значительного теплового и магнитного гистерезисов. Оптимальными являются материалы с фазовым переходом второго рода на основе редкоземельных элементов, например, Tb_3Co , $TbCo_2C$ и R_3Ni_2 , являющиеся перспективными кандидатами для магнитного охлаждения в области низких температур [11—13].

В данной работе мы сообщаем о магнитных и магнитокалорических свойствах сплава Gd_3In , обладающего высоким магнитным моментом и малым гистерезисом (см. рисунок). Как видно из рисунка, выход намагниченности на насыщение происходит в полях около 1Тл, что вполне достижимо даже при использовании постоянных магнитов. Все это делает исследуемый сплав интересным кандидатом для технологии магнитного охлаждения.



Петля гистерезиса сплава Gd_3In при $T = 50\text{ K}$



- [1] E. Brück, J. Phys. D: Appl. Phys. **38**, R381 (2005).
- [2] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner Jr., Phys. Rev. Lett. **78**, 4494 (1997).
- [3] A. Giguere, M. Foldeaki, W. Schnelle, E. Gmelin, J. Phys. Condens. Matter. **11**, 6969 (1999).
- [4] F.X. Hu, B.G. Shen, J.R. Sun, Z.H. Cheng, G.H. Rao, X.X. Zhang, Appl. Phys. Lett. **78**, 3675 (2001).
- [5] H. Wada, Y. Tanabe, Appl. Phys. Lett. **79**, 3302 (2001).
- [6] O. Tegus, E. Brück, K.H.J. Buschow, F.R. deBoer, Nature **415**, 150 (2002).
- [7] N.T. Trung, V. Biharie, L. Zhang, L. Caron, K.H.J. Buschow, E. Brück, Appl. Phys. Lett. **96**, 162507 (2010).
- [8] E.K. Liu, W.H. Wang, L. Feng, W. Zhu, G.J. Li, J.L. Chen, H.W. Zhang, G.H. Wu., C.B. Jiang, H.B. Xu, F.R. deBoer, Nat. Commun. **3**, 873 (2012).
- [9] T. Krenke, E. Duman, M. Acet, E.F. Wassermann, X. Moya, L. Mañosa, A. Planes, Nat. Mater. **4**, 450 (2005).
- [10] J. Liu, T. Gottschall, K.P. Skokov, J.D. Moore, O. Gutfleisch, Nat. Mater. **11**, 620 (2012).
- [11] B. Li, J. Du, W.J. Ren, W.J. Hu, Q. Zhang, D. Li, Z.D. Zhang, Appl. Phys. Lett. **92**, 242504 (2008).
- [12] B. Li, W.J. Hu, X.G. Liu, F. Yang, W.J. Ren, X.G. Zhao, Z.D. Zhang, Appl. Phys. Lett. **92**, 242508 (2008).
- [13] Q.Y. Dong, J. Chen, J. Shen, J.R. Sun, B.G. Shen, Appl. Phys. Lett. **99**, 132504 (2011).

Магнитокалорический эффект в сплаве GdZn в циклических магнитных полях

Ш. Э. Джабраилов¹, А. М. Алиев¹, V. Franco²

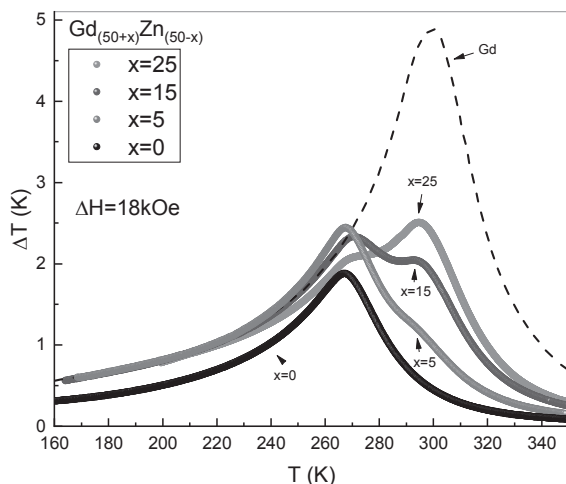
¹ Институт физики им. Х. И. Амирханова, ДФИЦ РАН, Махачкала, Россия. dzhabrailov70419@mail.ru, lowtemp@mail.ru

² Department of Condensed Matter Physics, University of Sevilla, University of Seville, C / San Fernando 4, Seville, Spain, 41080. vfranco@us.es

Одним из эталонных материалов для МКЭ является Gd, а также сплавы на его основе. Одним из таких перспективных магнитокалорических сплавов является двухфазный сплав GdZn.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований магнитокалорического эффекта в $Gd_{(50+x)}Zn_{(50-x)}$ ($x = 0, 5, 15$ и 25 ат. %) прямым методом в циклических магнитных полях в интервале температур $150\text{--}350$ К и в магнитных полях до 18 кЭ. Прямые измерения адиабатического изменения температуры проводились модуляционным методом.

На рисунке приведена температурная зависимость МКЭ для образцов $GdZn$ в магнитном поле $H = 18$ кОе. Из рисунка видно, что наибольшая величина эффекта наблюдается у сплава $Gd_{75}Zn_{25}$ и составляет $\Delta T_{ad} = 2.51$ К. Для образцов $Gd_{65}Zn_{35}$, $Gd_{55}Zn_{45}$ и $Gd_{50}Zn_{50}$ максимумы эффекта составляют $\Delta T_{ad} = 2,33, 2,43, 1,83$ К. Для сравнения, на рисунке также приведены данные МКЭ для чистого Gd .



МКЭ в сплаве $GdZn$

В исследуемых составах наблюдаются две фазы с различным значением критической температуры. По мере увеличения концентрации Zn высокотемпературная фаза уменьшается, и в сплавах $Gd_{55}Zn_{45}$ и $Gd_{50}Zn_{50}$ наблюдается только низкотемпературная фаза. Исследования МКЭ в $GdZn$ показали, что данные сплавы являются перспективными для использования в качестве хладагента твердотельных магнитных охлаждающих машин.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 18-12-00415).



Магнитные свойства $Fe_{49}Ni_{49}X_2$ ($X = Al, Ti$) сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации

М. Н. Ульянов^{1, 2}, М. Ю. Богуш¹, М. А. Гаврилова¹,
С. В. Таскаев^{1, 3}, Zhang Hu⁴, Д. В. Гундеров⁵

¹ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

² Балтийский федеральный университет им. И. Канта,
Калининград, Россия. *max-39@yandex.ru*

³ Южно-Уральский государственный университет (НИУ), Челябинск,
Россия. *tsv@csu.ru*

⁴ University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083,
P. R. China. *zhanghu@ustb.edu.cn*

⁵ Уфимский государственный авиационный технический университет,
Уфа, Россия. *dimagun@mail.ru*

Практически полным монополистом на рынке редкоземельных элементов является КНР. Альтернативы КНР в поставке редкоземельных элементов на сегодняшний день нет. Растущий в последние годы внутренний спрос на редкоземельные элементы в Китае привел к ограничению их поставок на международный рынок, поэтому остро возникла необходимость развития альтернативных постоянных магнитов, не содержащих редкоземельных элементов [1—6].

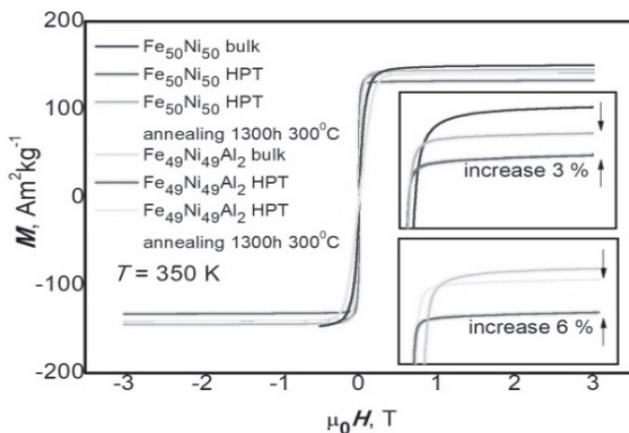
Предлагаемый проект направлен на интеграцию достижений теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание инновационного направления получения новых функциональных материалов, в частности новых типов постоянных магнитов, не использующих критические (в том числе редкоземельные) элементы. Высокоэффективные постоянные магниты стали незаменимыми материалами во многих отраслях промышленности, начиная от хранения данных до малых двигателей и устройств экологически чистой энергии. Таким образом, сокращение содержания критических элементов при производстве постоянных магнитов является адекватным ответом на кризис поставок редкоземельных металлов и их оксидов и позволит уйти от монопольного доминирования КНР на рынке редкоземельных элементов.

Наряду с редкоземельными системами, некоторые сплавы на основе Fe являются одними из многообещающих кандидатов в каче-

была связана с тем, что в метеоритах возможно содержание незначительных количеств фазы $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$, которая, в свою очередь, может влиять на формирование $L1_0$ фазы.

В данной работе мы сообщаем о магнитных свойствах $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{49}\text{X}_2$ ($\text{X} = \text{Al, Ti}$) сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением, а также о результате низкотемпературного отжига, ускоряющего образование фазы $L1_0$.

Полевые зависимости намагниченности до и после низкотемпературного отжига для пластически деформированных сплавов $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{49}\text{Al}_2$ и $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ при $T = 350 \text{ K}$ представлены на рисунке.



Полевые зависимости намагниченности до и после низкотемпературного отжига для пластически деформированных сплавов $\text{Fe}_{49}\text{Ni}_{49}\text{Al}_2$ и $\text{Fe}_{50}\text{Ni}_{50}$ при $T = 350 \text{ K}$

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 19-72-00047 и программы повышения конкурентоспособности БФУ им. И. Канта (5-100).

- [1] K. Kramer, Phys. Today. **63**, 22-24 (2010).
- [2] J.M.D. Coey, Scripta Materialia **67**, 524-529 (2012).
- [3] S. Sugimoto, J. Phys. D: Appl. Phys. **44**, 064001 (2011).
- [4] R. Skomski, J.E. Shield, and D.J. Sellmyer, An elemental question. Magnetism Technology International, UKIP Media & Events, Ltd. (2011).
- [5] M.J. Kramer et al., JOM **64**, 752-763 (2012).
- [6] B. Balamurugan et al., Scripta Materialia **67**, 542-547 (2012).
- [7] C.-W. Yang, D.B. Williams, and J.I. Goldstein, J. Phase Equilib. **17** (6), 522 (1996).

- [8] M. Mizuguchi, S. Sekiya, and K. Takanashi, *J. Appl. Phys.* **107**, 09A716 (2010).
- [9] T. Kojima, M. Mizuguchi, T. Koganezawa, K. Osaka, M. Kotsugi, and K. Takanashi, *Jpn. J. Appl. Phys.* **51**, 010204 (2012).
- [10] P. Wasilewski, *Phys. Earth Planet. Inter.* **52**, 150 (1988).
- [11] R. Skomski and J.M.D. Coey, *Permanent Magnetism*, Institute of Physics, Bristol (1999).
- [12] R. Skomski, P. Manchanda, P. Kumar, B. Balamurugan, A. Kashyap, and D.J. Sellmyer, *IEEE Trans. Magn.* **49(7)**, 3215 (2013).
- [13] L. Neel, J. Pauleve, R. Pauthenet, J. Laugier, and D. Dautreppe, *J. Appl. Phys.* **35**, 873 (1964).
- [14] L. Neel, J. Pauleve, D. Dautreppe, and J. Laugier, *C. R. Acad. Sc.* **254**, 965 (1962).
- [15] K. B. Reuter, D. B. Williams, and J. I. Goldstein, *Metall. Mater. Trans. A* **20**, 711 (1989).
- [16] T. Shima, M. Okamura, S. Mitani, and K. Takanashi, *J. Magn. Magn. Mater.* **310**, 2213 (2007).
- [17] T. Kojima, M. Mizuguchi, and K. Takanashi, *J. Phys.: Conf. Ser.* **266**, 012119 (2011).
- [18] M. Mizuguchi, T. Kojima, M. Kotsugi, T. Koganezawa, K. Osaka, and K. Takanashi, *J. Magn. Soc. Jpn.* **35**, 370 (2011).
- [19] P. Manchanda, R. Skomski, N. Bordeaux, L.H. Lewis, and A. Kashyap, *Journal of Applied Physics* **115**, 17A710 (2014).
- [20] L. Ma, D.B. Williams, and J.I. Goldstein, *J. Phase Equilib.* **19**, 299 (1998).
- [21] I.G. Kabanova, V.V. Sagaradze, and N.V. Kataeva, *Phys. Met. Metallogr.* **112**, 267 (2011).

Влияние магнитного поля и давления на транспортные свойства в сплаве гейслера $Ni_{43}Mn_{46}In_{11}$ в области фазового перехода

А. Н. Ханов, Т. Р. Арсланов, А. М. Алиев

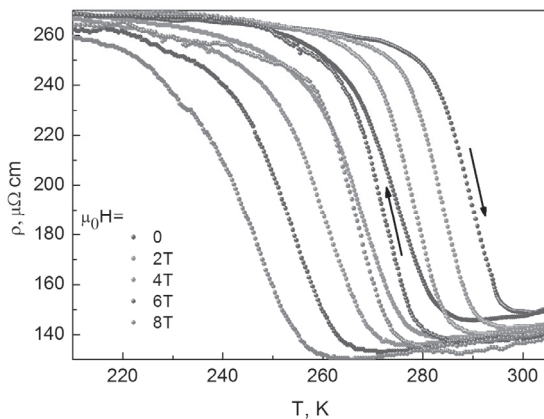
ФГБУН Институт физики им. Х. И. Амирханова ДФИЦ РАН,
Махачкала, Россия. *arslanovt@gmail.com*

Семейство полуметаллических сплавов Гейслера с общей формулой Ni-Mn-X (где X = In, Ga, Sb) представляют широкий интерес для различных практических приложений в связи с наблюдением

в них последовательной динамики магнитных превращений. Характерным для соединений Ni-Mn-In является преобладание свойств формы памяти из-за выраженного метамагнитного перехода. При этом может реализовываться полное исчезновение спонтанной намагниченности в фазе мартенсита [1], т. е. магнитоструктурное превращение происходит между ферромагнитной фазой аустенита и парамагнитной мартенситной фазой. Наиболее интересные и необычные физические свойства подобных фазовых превращений связываются с рядом явлений, такие как обратимая деформация в сильных магнитных полях [1; 2], гигантское магнетосопротивление [3] и магнитокалорический эффект [4]. Привлечение магнитного поля или давления представляется эффективным методом воздействия для контроля ферромагнитной фазы аустенита. В данной работе проведено исследование удельного сопротивления и намагниченности в соединениях $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{46}\text{In}_{11}$ в магнитных полях до 8 Т и высокого давления до 2.75 ГПа.

На рисунке показана температурная зависимость удельного сопротивления, $\rho(T)$, измеренная в различных полях $H = 0\text{—}8$ Т, с использованием 4-контактного метода на образце в форме параллелепипеда. Измерения удельного сопротивления проводились в режиме нагрева (FH) и охлаждения (FC) (на рисунке показаны стрелками), захватывая ключевые области температур — аустенит-мартенситного и ферромагнитного-парамагнитного (ферро-пара) превращений (77—340 К). В отсутствие магнитного поля зависимость удельного сопротивления демонстрирует переход полупроводник-металл вблизи 280 К, что соответствует мартенситному магнитоструктурному переходу. Данная область проявляет гистерезисное поведение с шириной ~ 45 К. С приложением поля происходит заметное смещение гистерезиса в область низких температур с его уширением ~ 80 К. Зависимость $\rho(T)$ при $H=0$, измеренная при различных давлениях (0—2,75 ГПа) показывает противоположное поведение Во-первых, область гистерезиса смещается в сторону высоких температур, с заметным сужением его ширины. Во-вторых, область низкотемпературной зависимости $\rho(T)$ обладает металлическим типом проводимости. Это может свидетельствовать в пользу того, что область существования ферромагнитной фазы аустенита постепенно уменьшается с ее разупорядочением при повышении давления. Результаты измерения температурной зависимости намагниченности, $M(T)$ воспроизводит эти магнитные превращения.





Температурная зависимость $\rho(T)$, в магнитных полях до 8 Т в режимах нагрева и охлаждения

В широком интервале температур был исследован эффект магнетосопротивления (МС), который в области перехода полупроводник-металл при $T = 260$ К (режим FH) демонстрировал наибольшее значение $\sim 50\%$ в поле 8 Т. Отрицательное МС обнаруживалось во всем интервале температур, включая, как область перехода полупроводник-металл, так и в фазах аустенита и мартенсита. Однако поведение полевых зависимостей отрицательного МС в трех различных областях температур представлялось весьма различным. В частности, в области $T = 260$ К МС носит квазилинейный характер до ~ 5 Т, что может быть признаком наличия спин-поляризованных носителей заряда. При $T = 275$ К полевая зависимость МС демонстрирует отличное от $\Delta\rho/\rho_0 \sim H^2$ поведение, что в настоящий момент выступает предметом обсуждения.

Таким образом, в полуметаллическом сплаве Гейслера $\text{Ni}_{43}\text{Mn}_{46}\text{In}_{11}$ исследовано влияние магнитного поля до 8 Т и гидростатического давления до 2,75 ГПа в областях магнитоструктурного метамагнитного (аустенит-мартенсит) и ферро-пара превращений. Показано, что воздействие магнитного поля и давления индуцируют противоположную динамику этих превращений. В гистерезисной области при $T \approx 260$ К формируется гигантское отрицательное магнетосопротивление, $\Delta\rho/\rho_0 = 50\%$ при $H = 8$ Т.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-02-00031.



- [1] R. Kainuma, Y. Imano, W. Ito et al., Nature **439**, 957 (2006).
 [2] A. Sozinov, A. A. Likhachev et al., Appl. Phys. Lett. **80**, 1746 (2002).
 [3] S. Banik, R. Rawat et al. Rev. B **77**, 224417 (2008).
 [4] A. M. Aliev, A. B. Batdalov et al., Appl. Phys. Lett. **97**, 212505 (2010).

Сплавы и соединения для магнитного охлаждения при комнатных и криогенных температурах: ретроспектива и перспективы

В. В. Ховайло^{1,2}, С. В. Таскаев^{2,3}

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия. *khovaylo@misis.ru*

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия.
tsv@csu.ru

Гигантский магнитокалорический эффект (МКЭ) привлек большое внимание с момента его открытия в 1997 году [1]. Первые сообщения о гигантском изотермическом изменении магнитной энтропии $\Delta \Delta S_m$ при магнитных фазовых переходах первого рода в сплавах и соединениях на основе марганца указали на их хорошие перспективы для практических применений в технологии магнитного охлаждения при комнатных температурах. На раннем этапе исследования МКЭ в этих материалах использование соотношения Максвелла было наиболее распространенным подходом для вычисления ΔS_m по результатам измерений намагниченности. Однако первые «прямые» измерения ΔS_m , проведенные Бучельниковым и др. [2], а также последующие измерения ΔS_m калориметрическими методами [3; 4], поставили под сомнение вывод о практической применимости МКЭ в сплавах Гейслера, сделанный исключительно на основе магнитных измерений. Более того, первые сообщения о прямых измерениях адиабатического изменения температуры ΔT_{ad} показали, что сплавы и соединения на основе марганца, в частности сплавы Гейслера, имеют довольно слабые перспективы практических применений из-за небольшой величины ΔT_{ad} . Более поздние исследования МКЭ при циклическом воздействии внешнего магнитного поля выявили еще одну проблему, которую необходимо преодолеть — необратимость ΔT_{ad} [5]. Тем

не менее собранные данные об особенностях МКЭ в окрестности магнитных фазовых переходов первого рода позволили установить критерии применимости таких материалов для магнитного охлаждения при комнатной температуре.

Значительный прогресс в разработке материалов для магнитного охлаждения при комнатных температурах возобновил интерес к материалам, перспективным для ожижения криогенных газов. Многочисленные исследования выявили большое количество сплавов и соединений, которые демонстрируют значительный МКЭ в интересующей области температур от 15 до 150 К [6]. Почти все эти материалы представляют собой интерметаллические соединения на основе редкоземельных элементов, такие как RTX , R_3T и RT_2 (R — редкоземельный металл, T — $3d$ или $4d$ переходной металл, X — химический элемент основной группы). Как правило, для большинства этих материалов температуру Кюри T_C , при которой МКЭ максимальный, сравнительно легко «настроить» на желаемое значение. Это позволяет спроектировать магнитную охлаждающую машину для эффективного ожижения технологически важных газов, таких как водород (температура кипения $T_b = 20$ К), кислород (температура кипения $T_b = 54$ К) и азот (температура кипения $T_b = 77$ К). Принимая во внимание быстрое развитие сверхпроводящих магнитов, которые могут генерировать магнитные поля 15—22 Тл, исследование МКЭ в сильных магнитных полях представляет значительный интерес для разработки перспективных технологий криогенного магнитного охлаждения.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-42-06201.

- [1] V.K. Pecharsky, K.A. Gschneidner, Jr., Phys. Rev. Lett. **78**, 4494 (1997).
- [2] V.D. Buchelnikov et al, Int. J. Appl. Electromagn. Mech. **23**, 65 (2006).
- [3] X. Moya et al, J. Magn. Magn. Mater. **316**, e572 (2007).
- [4] J.-D. Zou et al, Adv. Mater. **21**, 693 (2009).
- [5] V.V. Khovaylo et al, Appl. Phys. Lett. **97**, 052503 (2010).
- [6] H. Zhang, et al., Physica B **558**, 65 (2019).



Технология синтеза монокристаллических сплавов Гейслера семейства Ni-Mn-Ga для применения в каскадной системе магнитокалорического охлаждения

В. Г. Шавров¹, Э. Т. Дильмиева¹, А. П. Сиваченко²,
А. В. Головчан², А. И. Иванова³, Р. М. Гречишкин³, А. Д. Зигерт³,
А. П. Каманцев¹, В. В. Коледов¹

¹ Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Москва, Россия. shavrov@cplire.ru

² Донецкий физико-технический университет им. А. А. Галкина,
Москва, Россия

³ Тверской государственный университет, г. Тверь, Россия

Сплавы Гейслера и их применение в области магнитокалорического охлаждения остаются актуальной темой и по сегодняшний день. Сплавы Гейслера, обладающие магнитноструктурным фазовым переходом 1-го рода, вызывают большой интерес, как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения [1]. Во-первых, сплавы Гейслера демонстрируют широкое разнообразие фазовых переходов (ФП) в широком диапазоне температур и, связанных с ними, гигантских эффектов и вполне оправдывают наименование «мультифункциональных» [2]. Во-вторых, характерная черта сплавов Гейслера — крайне чувствительная зависимость температур ФП от химического состава — привлекает внимание возможностью применения его в системе каскадного твердотельного охлаждения [3]. Однако существует ряд физических и технологических проблем на пути широкого применения сплавов Гейслера. Одна из них — разработка технологии синтеза сплавов Гейслера, позволяющая контролировать химический состав с высокой точностью, что в свою очередь позволит, контролировать температуры ФП. Управление температурами магнитноструктурного ФП раскрывает возможности создания каскадной твердотельной системы охлаждения на основе магнитокалорического эффекта. Таким образом, актуальной задачей является разработка технологии синтеза сплавов Гейслера, обладающих магнитноструктурным ФП путем контроля химического состава.

В настоящее время практически все научные группы синтезируют монокристаллические сплавы Гейслера, обладающих мартен-

ситным ФП, по единой схеме многократного переплава порошков исходных элементов в аргонно-дуговой печи (для получения однородного состава), взятых в заданных пропорциях с учетом испарения, и последующего выращивания из полученного сплава монокристаллов методом Бриджмена в герметичных тиглях из кварца или нитрида бора под избыточным давлением аргона (~ 2 атм.). Такая схема получения образцов достаточно проста, однако обладает существенными недостатками. Во-первых, сложно получить прецизионной слиток нужного состава аргонно-дуговым переплавом из-за высокой температуры дуги и большой разницы в температурах плавления и упругости пара исходных элементов. Во-вторых, при выращивании кристаллов Ni-Mn-Ga нестехиометрического состава, избыточные элементы могут выступать как примеси по отношению к основному стехиометрическому составу, и если растворимость в жидкой и твердой фазах этого элемента в основной матрице различна (большая величина равновесного коэффициента распределения (сегрегации) примесей), то в процессе выращивания монокристалла методом Бриджмена, при малых скоростях роста, будет происходить перераспределение элементов по длине затвердевшего кристалла [4]. В-третьих, при выращивании монокристалла в тигле взаимодействие расплава со стенками тигля приводит к нарушениям в кристаллической структуре выращенного монокристалла. Поэтому авторы работы предлагают использовать для получения монокристаллов сплавов Гейслера метод Чохральского с перемешиванием расплава в процессе роста. Соответственно, в докладе на примере системы Ni-Mn-Ga будут представлены результаты отработки технологии синтеза монокристаллических сплавов Гейслера для контроля заданного химического состава вдоль роста монокристалла. Обсуждается также применение сплавов с повышенной точностью температуры ФП в каскадных системах твердотельного охлаждения в криогенной области.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ № 20-19-00745.

[1] A.G. Gamzatov, A.M. Aliev, et.al., Appl. Phys. Lett. **113** (17), 172406 (2018).

[2] A.P. Kamantsev, et.al., J. Appl. Phys. **117** (16), 163903 (2015),

[3] E. T. Dilmieva, et.al. IEEE Trans.Magn. **53**, 11 (2017).

[4] D. Yancho, et.al., Materials and Design **134**, 469—475 (2017)



Влияние внутренних напряжений на функциональные свойства микропроводов сплавов Гейслера Ni-Mn-Ga

С. Н. Шевырталов¹, В. В. Родионова¹, К. А. Чичай¹,
В. Жукова², А. Жуков^{2,3,4}

¹ Балтийский федеральный университет имени И. Канта,
Калининград, Россия. *shevyrtalov@gmail.com*

² Dpto. de Física de Materiales, Fac. Químicas, UPV/EHU,
Сан-Себастьян, Испания

³ Dpto. de Física Aplicada, EUPDS, UPV/EHU, Сан-Себастьян, Испания

⁴ IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, Бильбао, Испания

Сплавы Гейслера на основе Ni-Mn-Ga привлекли к себе значительное внимание за счет присутствия в них бездиффузионного и обратимого фазового превращения, которое представляет собой структурный переход из кубической аустенитной фазы с высокой симметрией в мартенситную фазу с низкой симметрией. Из данной особенности вытекают такие функциональные свойства как эффект памяти формы, магнитоиндуцированное растяжение и магнитокалорический эффект. Тем не менее использование сплавов Ni-Mn-Ga в технологических приложениях ограничено из-за их хрупкости и сложности в обработке. Изготовление микропроводов в стеклянной оболочке на основе Ni-Mn-Ga методом Улитовского — Тейлора может стать одним из решений за счет двух преимуществ: метод позволяет изготавливать длинные микропровода в стекле до 10 км в длину с диаметром микропровода от 1 микрона; стеклянная оболочка при этом усиливает механические характеристики и защищает металлическую жилу.

В данной работе было исследовано влияние внутренних напряжений на структурные, магнитные свойства и фазовые переходы в микропроводах Ni-Mn-Ga с высоким содержанием никеля. Мы изготовили два типа микропроводов — № 1 — Ni₆₃Mn₁₂Ga₂₅ с полным диаметром 54,6 мкм и диаметром металлической жилы 26,7 мкм и № 2 — Ni₆₁Mn₁₂Ga₂₇ с полным диаметром 21,4 мкм и диаметром металлической жилы 13,6 мкм.

Был проведен анализ раздельного влияния напряжений, создаваемых в результате затвердевания металла и за счет разницы между коэффициентами термического расширения металла и стекла, на

магнитные свойства микропроводов №1. За счет термического отжига в течение различного времени было установлено влияние первого типа напряжений. Снятие стеклянной оболочки показало влияние второго типа напряжений. Для анализа комплексного влияния напряжений мы провели термический отжиг микропровода после снятия стеклянной оболочки. Было проведено сравнение коэрцитивной силы, насыщения и остаточной намагниченности, а также температуры Кюри для установления влияния напряжений. Изменение направления легкой оси намагничивания было найдено для микропровода без стеклянной оболочки. Различия между размерами зерен на поверхности металлической жилы было установлено в отожженном микропроводе и микропроводе, отожженном после снятия стеклянной оболочки.

Мы также установили расщепление элементов и фазы по радиусу микропровода № 1 в результате высокотемпературного отжига. Частичное испарение марганца с внешней части жилы и расплавление стекла приводит к образованию оксида марганца на поверхности. Недостаток марганца в результате испарения приводит к образованию Ni_3Ga в промежуточной части провода, в то время как в центральной части остается сплав $\text{Ni}_{60}\text{Mn}_9\text{Ga}_{31}$ с кубической решеткой $L2_1$. Полученная слоистая структура демонстрирует магнитомягкое поведение до 270 К. Результаты были объяснены приняв во внимание химический состав, внутренние напряжения, рекристаллизацию и атомное упорядочение.

Мартенситное превращение было найдено ниже комнатной температуры в микропроводах № 2, отожженных при температуре 1000 К в течение часа. Однако остаточная мартенситная фаза была обнаружена даже после превращения, что свидетельствует о больших внутренних напряжениях, которые частично подавляют переход. Провод, отожженный при более низкой температуре 833 К не проявляет знаки мартенситного превращения, демонстрируя схожее с образцом № 1 зависимость. Температура Кюри сильно зависит от температуры отжига и присутствия стеклянной оболочки, подтверждая тип внутренних напряжений.

СПИСОК АВТОРОВ

- Barranco A. P.
Belo J. H.
Franco V.
Gebara P.
Kurniawan Budhy
Nanto S. Dwi
Yu S. C.
Zhang Hu
Абдулкадилова Н. З.
Алиев А. М.
Амиров А. А.
Андреев С. В.
Аникин М. С.
Арсланов Т. Р.
Батаев Д. С.
Батдалов А. Б.
Башарова А. А.
Белова О. В.
Богуш М. Ю.
Богуш М. Ю.
Бутвина Л. Н.
Бучельников В. Д.
Быбик М. С.
Бычков И. В.
В. В. Коледов
Вальков В. И.
Гаврилова М. А.
Гаджиев А. Б.
Гайфуллин Р. Ю.
Галеев Р. М.
Гамзатов А. Г.
Гамзатов А. Г.
Головчан А. В.
Горюнов С. В.
Гречишкин Р. М.
Гундеров Д. В.
Джабраилов Ш. З.
Дильмиева Э. Т.
Жуков А.
Жукова В.
Загребин М. А.
Зигерт А. Д.
Зинин А. В.
Знаменская И. А.
Зыбцев С.
Иванова А. И.
Иржак А.
Калашников В. С.
Калинкин Д. А.
Каманцев А. П.
Каманцев А. П.
Коледов В. В.
Колесов К. А.
Кольчугина Н. Б.
Кононова М. В.
Кошелев А. В.
Кошкидько Ю. С.
Кузнецов Д. Д.
Кузьмин Д. А.
Кули-заде Т. А.
Лега П. В.
Матюнина М. В.
Маширов А. В.
Маширов А.
Маширов А. В.
Метлов Л. С.
Метлов Л. С.
Митюк В. И.
Морозов Е. В.
Морозов Е. В.
Мулюков Р. Р.
Мусабириев И. И.
Мухучев А. А.
Начинова Д. В.
Незнахин Д. С.
Несоломенов А.
Несолёнов А. В.
Орлов А.
Орлов А. П.
Петров
Петров А.
Петров А. О.
Плахотский Д. В.
Римский Г. С.
Родионова В. В.
Самвелов А. В.
Сафаров И. М.
Селезнёва Н. В.
Сёмкин М. А.
Сиваченко А. П.
Соколовский В. В.
Суслов Д. А.
Тарасов Е. Н.
Таскаев С. В.
Терентьев Ю. А.
Техтелев Ю. В.
Тодрис Б. М.
Толкачев В. А.
Ульянов М. Н.
Фонстратовски С.
Ханов Л. Н.
Ховайло В. В.
Цвик Я.
Чичай К. А.
Шавров В. Г.
Шандрюк Г. А.
Шевыргалов С. Н.
Шеляков А. В.
Ясев С. Г.

ОГЛАВЛЕНИЕ



*В. Коледов, А. Петров, А. Иржак, С. Фонтратовски,
А. Маширов, В. Шавров, А. Каманцев, А. Несолонов,
П. Лега, А. Орлов, С. Зыбцев.*

Фазовые переходы и функциональные свойства высокотемпературных
сверхпроводников с топологией интерферометра. 3

*Е. В. Морозов, В. В. Коледов, В. Г. Шавров, И. А. Знаменская,
Т. А. Кули-заде, А. В. Шеляков, Л. С. Метлов*

Термомеханические свойства и эластокалорический эффект
в сплаве Ti_2NiCu при разной степени кристаллизации. 4

Н. З. Абдулкадирова, А. М. Алиев, А. Г. Гамзатов и Р. Ġ̇bara

Магнитотермические аномалии в $LaFe_{11,1}Mn_{0,1}Co_{0,7}Si_{1,1}$ 7

А. А. Амиров

Мультикалорики — новые материалы энергетики и стрейнтроники 8

*М. С. Аникин, Е. Н. Тарасов, Д. С. Незнахин, М. А. С̇̇мкин,
Н. В. Селезн̇̇ва, С. В. Андреев, А. В. Зинин*

Влияние магнитной структуры $Er_{1-x}Y_x(Co_{0,84}Fe_{0,16})_2$
на магнитокалорический эффект 11

*А. М. Алиев, А. Б. Батдалов, А. Г. Гамзатов, А. А. Амиров, Л. Н. Ханов,
Н. З. Абдулкадирова, В. В. Коледов, В. Г. Шавров, С. В. Таскаев*

Поиск оптимальных магнитокалорических материалов:
исследование МКЭ в циклических магнитных полях 13

*М. Ю. Бозуш, С. В. Таскаев, В. В. Ховайло, М. Н. Ульянов, Д. С. Батаев,
Д. В. Плахотский, М. А. Гаврилова, М. В. Кононова, Zhang Hu*

Физические и магнитокалорические свойства твёрдых
растворов $Du_{100-x}In_x$ 15

*М. Ю. Бозуш, С. В. Таскаев, В. В. Ховайло, М. Н. Ульянов, Д. С. Батаев,
Д. В. Плахотский, М. А. Гаврилова, М. В. Кононова, А. А. Башарова, Zhang Hu*

Физические и магнитокалорические свойства твёрдых
растворов $Du_{100-x}Y_x$ 17

*М. Ю. Бозуш, С. В. Таскаев, В. В. Ховайло, М. Н. Ульянов, Д. С. Батаев,
Д. В. Плахотский, М. А. Гаврилова, М. В. Кононова, А. А. Башарова, Zhang Hu*

Магнитокалорические свойства сплава $GdAl_2$ — материала
для магнитных охлаждающих систем 19



<i>М. Ю. Бозуш, С. В. Таскаев, В. В. Ховайло, М. Н. Ульянов, Д. С. Батаев, Д. В. Плахотский, М. А. Гаврилова, М. В. Кононова, Zhang Hu</i>	
Физические свойства сплава $GdNi_2$ в криогенных температурах при воздействии высокочастотных полей до 50 Т	22
<i>М. С. Быбик, А. Р. Barranco, Г. А. Шандрюк, В. В. Коледов, Д. Д. Кузнецов, В. С. Калашников, А. В. Несолёнов, В. Г. Шавров</i>	
Фазовые превращения и связанные с ними свойства в мультифункциональных керамических материалах	24
<i>И. В. Бычков, Д. А. Кузьмин, В. А. Толкачев, В. Г. Шавров</i>	
Радиационная теплопередача в наноструктурах при фазовом переходе	26
<i>В. И. Вальков, А. В. Головчан, Г. С. Римский, В. И. Митюк, В. В. Коледов, А. В. Маширов, С. В. Таскаев</i>	
Анализ особенностей магнитных и магнитокалорических свойств сплавов системы $Mn_{1-x}Co_xNiGe$ ($0,05 \leq x \leq 0,80$)	27
<i>А. Б. Гаджиев, А. Г. Гамзатов, А. М. Алиев, S. Dwi Nanto, Budhy Kurniawan, S. C. Yu</i>	
Теплоемкость и магнитокалорический эффект в манганите $La_{0,7}Sr_{0,3-x}Ba_xMnO_3$ ($x = 0, 0,02, 0,05, 0,10$)	30
<i>А. Г. Гамзатов, А. М. Алиев, Н. Абдулкадирова, Н. В. Zhou, J. Wang, Feng-xia Hu, B. G. Shen</i>	
Изучение эффектов деградации магнитокалорического эффекта в системе $La_{1-x}Pr_xFe_{13,7}Si_{1,3}-H_d$ при долговременном воздействии циклических магнитных полей	32
<i>А. А. Мухучев, А. М. Алиев, А. А. Амиров, J. H. Belo</i>	
Магнитокалорический эффект семейства сплавов $Gd_5(Si_xGe_{1-x})_4$ в циклических магнитных полях	34
<i>М. А. Загребин, В. В. Соколовский, В. Д. Бучельников</i>	
Феноменологическое исследование температурного гистерезиса в сплавах Гейслера	36
<i>А. П. Каманцев, В. В. Коледов, В. Г. Шавров, Л. Н. Бутвина, А. В. Головчан, Б. М. Тодрис, В. И. Вальков, С. В. Таскаев</i>	
Магнитокалорический эффект и намагниченность гадолиния в стационарных и импульсных магнитных полях до 40 кЭ	38
<i>А. П. Каманцев, В. В. Коледов, В. Г. Шавров, Л. Н. Бутвина, А. В. Головчан, Б. М. Тодрис, А. П. Сиваченко, В. И. Вальков, А. В. Кошелев, Г. А. Шандрюк</i>	
Магнитокалорический эффект и намагниченность композитного $MnAs$ в импульсных магнитных полях до 40 кЭ	40

<i>К. А. Колесов, А. В. Маширов, В. В. Коледов, О. В. Белова,</i> <i>Д. А. Калинин, С. В. Горюнов, А. П. Каманцев, А. О. Петров, В. Г. Шавров</i>	
Механический тепловой ключ для холодильной машины с МКЭ	43
<i>Ю. С. Кошкидько, Э. Т. Дильмиева, А. П. Каманцев, А. В. Маширов,</i> <i>Я. Цвик, Н. Б. Кольчугина, В. В. Коледов, В. Г. Шавров</i>	
Магнитокалорические материалы для низкотемпературного магнитного охлаждения	45
<i>П. В. Лега, А. П. Орлов, В. В. Коледов, В. Г. Шавров</i>	
Фазовые превращения и гигантские эффекты в мультифункциональных мате- риалах на наномасштабе	47
<i>М. В. Матюнина, В. В. Соколовский, М. А. Загребин, В. Д. Бучельников</i>	
Структурные, магнитные и магнитокалорические свойства в сплавах Fe-Ga	48
<i>Л. С. Метлов, В. В. Коледов, В. Г. Шавров, Е. В. Морозов,</i> <i>Ю. В. Тихтелев, С. В. Таскаев</i>	
Моделирование калорических эффектов в сплавах Гейслера	50
<i>И. И. Мусабилов, И. М. Сафаров, Р. М. Галеев, Р. Ю. Гайфуллин,</i> <i>А. Б. Гаджиев, А. М. Алиев, В. В. Коледов, Р. Р. Мулюков</i>	
Влияние микроструктуры на магнитокалорический эффект в сплаве $Ni_{2,16}Mn_{0,78}Ga_{0,98}Si_{0,07}$	52
<i>А. О. Петров, А. В. Маширов, В. В. Коледов, А. П. Каманцев,</i> <i>К. А. Колесов, В. Г. Шавров</i>	
Захват магнитного потока в образце керамики ВТСП $YBa_2Cu_3O_7$ и его частичное разрушение	54
<i>В. В. Соколовский, Д. В. Начинова, М. А. Загребин, В. Д. Бучельников</i>	
Основное состояние, магнитные и магнитокалорические свойства сплава Гейслера Ni-Mn-Sn с эквипотенциальным составом Ni и Mn	56
<i>Д. А. Суслов, В. Г. Шавров, В. В. Коледов, А. В. Маширов,</i> <i>Ю. А. Терентьев, А. Петров, А. П. Каманцев, А. В. Самвелов,</i> <i>С. Г. Ясев, С. В. Таскаев</i>	
Сравнение циклов криогенного охлаждения на основе газообразного рабочего тела и твердотельных магнитных материалов с фазовыми переходами	59
<i>С. В. Таскаев, В. В. Ховайло, М. Н. Ульянов,</i> <i>Д. С. Батаев, М. Ю. Богуш, Zhang Ni</i>	
Магнитокалорический эффект в сплаве Gd_3In , перспективном для технологии магнитного охлаждения при низких температурах	60
<i>Ш. З. Джабраилов, А. М. Алиев, V. Franco</i>	
Магнитокалорический эффект в сплаве GdZn в циклических магнитных полях	62

М. Н. Ульянов, М. Ю. Богуш, М. А. Гаврилова, С. В. Таскаев, Zhang Ni, Д. В. Гундеров	
Магнитные свойства $Fe_{49}Ni_{49}X_2$ ($X = Al, Ti$) сплавов, подвергнутых интенсивной пластической деформации	64
Л. Н. Ханов, Т. Р. Арсланов, А. М. Алиев	
Влияние магнитного поля и давления на транспортные свойства в сплаве гейслера $Ni_{43}Mn_{46}In_{11}$ в области фазового перехода	67
В. В. Ховайло, С. В. Таскаев	
Сплавы и соединения для магнитного охлаждения при комнатных и криогенных температурах: ретроспектива и перспективы	70
В. Г. Шавров, Э. Т. Дильмиева, А. П. Сиваченко, А. В. Головчан, А. И. Иванова, Р. М. Гречишкин, А. Д. Зигерт, А. П. Каманцев, В. В. Коледов	
Технология синтеза монокристаллических сплавов Гейслера семейства Ni-Mn-Ga для применения в каскадной системе магнитокалорического охлаждения	72
С. Н. Шевырталов, В. В. Родионова, К. А. Чичай, В. Жукова, А. Жуков	
Влияние внутренних напряжений на функциональные свойства микропроводов сплавов Гейслера Ni-Mn-Ga	74

Научное издание

**ДНИ КАЛОРИКИ В ДАГЕСТАНЕ:
МУЛЬТИКАЛОРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ**

Сборник тезисов

*16—20 сентября 2020 г.
Гуниб, Дагестан, Россия*

Корректор *Е. С. Меньшенина*
Верстка *Е. С. Меньшениной*

Подписано в печать 23.11.20.
Формат 60×84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,3.
Тираж 500 экз. Заказ 480.
Цена договорная

Челябинский государственный университет
454001, Челябинск, ул. Братьев Кашириных, 129

Отпечатано:
Издательство Челябинского государственного университета
454021, Челябинск, ул. Молодогвардейцев, 576