

# Низкотемпературная магнитострикция магнетиков и сверхпроводников (Вступительная статья)

Полтора столетия назад W. P. Joule продемонстрировал в экспериментах на железе чувствительность размеров и формы твердых тел к их магнитному состоянию (состоянию намагниченности) [1]. Это положило начало исследованию магнитострикционных (МС) эффектов, испытывавшему взлеты и спады, связанные до второй половины XX столетия преимущественно с перспективами технического применения МС материалов на основе переходных 3d-металлов. Открытие в 70-е годы гигантской магнитострикции в редкоземельных элементах Tb и Dy (1% при низких температурах) [2] положило начало новому этапу изучения МС, продолжившемуся в исследованиях взаимодействия между спиновой, орбитальной и упругой подсистемами в новых сильнокоррелированных соединениях на основе оксидов переходных металлов и редких земель. Несмотря на то что основные теоретические и экспериментальные результаты для них были получены при температурах существенно ниже комнатной, настоящий выпуск является первым изданием, посвященным исследованиям низкотемпературной МС.

Основные представления и классификация МС эффектов сформировались на начальной стадии их экспериментального исследования в переходных 3d-металлах [3–5]. Принято различать спонтанную МС, вызванную изменением температуры в нулевом поле, и вынужденную МС, индуцированную магнитным полем. Спонтанная МС возникает в области фазового перехода в магнитоупорядоченное состояние и связана с изотропным обменным взаимодействием, зависящим от расстояния между взаимодействующими частицами. В сферическом образце кубического кристалла она изотропна и представляет собой *объемную* МС, которая дает вклад в аномалию теплового расширения при температуре фазового перехода, эквивалентный магнитной составляющей параметра Грюнайзена. В образцах более сложной формы спонтанная МС содержит анизотропную составляющую, связанную с эффектами размагничивания, дипольными взаимодействиями — форм-эф-

фект. Спонтанная МС отражает чувствительность характеристик перехода (критической температуры) к давлению. Объемная МС обычно отрицательна. Исключение составляют, например, инваровые сплавы [6]. Большие положительные значения объемной МС, не исчезающей при температурах ниже температуры Кюри, определяют близкое к нулю низкотемпературное тепловое расширение, делая эти материалы привлекательными для технического использования.

Вынужденная МС возникает в результате смещения магнитных доменов в магнитоупорядоченной фазе под воздействием внешнего магнитного поля, а также при повороте вектора намагниченности во внешнем магнитном поле вследствие магнитокристаллической анизотропии, являющейся результатом релятивистских взаимодействий в электронной подсистеме [7], прежде всего спин-орбитальных взаимодействий.

Спонтанная и вынужденная МС могут быть разделены в термодинамическом рассмотрении как производные по деформации соответственно от обменной энергии и энергии магнитокристаллической анизотропии в термодинамическом потенциале [8]. В результате возникает набор магнитоупругих (МУ) коэффициентов, характеризующих чувствительность МС характеристик к интенсивным термодинамическим параметрам: температуре, механическим напряжениям (давлению), магнитному полю, в частности 18 коэффициентов пьезомагнетизма:

$$(d_{ijk})^T = \left( \frac{\partial B_k}{\partial \tau_j} \right)_{T,H} = \left( \frac{\partial \eta_{ij}}{\partial H_k} \right)_{T,\tau},$$

связанных с коэффициентом МУ связи  $k = E_{me}/\sqrt{E_e E_m}$ , определяющим способность данного образца преобразовывать магнитную энергию в механическую и наоборот. Учет осциллирующей компоненты в термодинамическом потенциале, связанной с квантованием Ландау электронного спектра, предполагает возможность существования при низких температурах осциллирующей по обратному полю магнитострикции, что ранее наблюда-

лось в диамагнитном висмуте [9]. В настоящем специальном выпуске сообщается об обнаружении осциллирующей МС в монокристаллах сверхпроводящего  $2H-NbSe_2$ .

Формализм, развитый E. R. Callen [3] на основе теоретико-группового анализа, позволил свести МС деформации низкосимметричных систем к неприводимым деформациям и ортонормализовать изотропные деформации. Это дает возможность рассматривать их независимо.

Наряду с феноменологическими описаниями проводился микроскопический анализ МС эффектов. Для переходных  $3d$ -металлов, в которых магнетизм определяется коллективизированными электронами, применимы зонные теории, требующие громоздких вычислений. Поэтому микроскопическая теория МС, которая бы описывала, например, ее температурные зависимости, пока не построена. Очевидно, в основе анизотропной МС в соединениях  $3d$ -элементов присутствует влияние ян-теллеровских взаимодействий, понижающих энергию низкосимметричной системы путем снятия электронного вырождения за счет деформации. Успехи в микроскопическом описании МС достигнуты для систем с локализованными магнитными моментами.

Локализованные магнитные моменты возникают в  $4f$ -лантаноидах и определяют большие значения их энергии магнитокристаллической анизотропии [10]. В этом случае магнитная анизотропия связана с несферичностью электронного облака. Их магнитоупорядоченное состояние является антиферромагнитным, а температуры перехода (температуры Нееля) обычно существенно ниже комнатной из-за слабого обменного взаимодействия. Эти элементы и соединения на их основе являются основными объектами низкотемпературных МС исследований. В парамагнитном состоянии их МС мала. Для практического использования желательное повышение температуры перехода, возможное при увеличении обменного взаимодействия. С этой целью проводится легирование  $4f$ -магнетиков  $3d$ -переходными элементами (например, Tb, Fe [11]).

Однако  $T_c$  — не единственная важная для практики характеристика МС материалов. Существенной является также возможность получения больших МС при повороте вектора намагниченности слабым магнитным полем, что может быть реализовано в материалах с малыми энергиями магнитной анизотропии и большими коэффициентами МУ связи. Эти условия могут выполняться в соединениях лантаноидов с противоположными по знаку магнитными анизотропиями и одним

знаком магнитострикции. Результаты исследования влияния легирования редкоземельных соединений элементами переходных металлов вблизи  $T_c$  приводятся в работах А. Б. Безносова и О. Прохненко с соавторами. Такая идеология привела к созданию знаменитого Terfenol-D (TbDyFe) [12]. Преимущества этих материалов особенно проявляются в монокристаллах, что повышает стоимость устройств на их основе. Современные технологии позволяют синтезировать пленки и наноструктуры произвольного состава. Результаты низкотемпературных исследований МУ характеристик пленочных и наноструктур на основе редкоземельных элементов приводятся и анализируются в настоящем выпуске J. I. Arnaudus с соавторами. В работе А. А. Звягина и Г. А. Звягиной предсказывается новый тип МУ взаимодействий в двумерных спин-электронных системах. Рассмотрены (R. W. McCallum с соавторами) альтернативные магнитострикционные материалы с повышенной коррозионной стойкостью. Влияние насыщения соединений TbFe водородом на параметры МУ связи с точки зрения эффектов кристаллического поля лигандов — тема статьи С. А. Никитина с соавторами.

Существенная часть выпуска посвящена низкотемпературным исследованиям перовскитоподобных структур на основе оксидов переходных металлов меди и марганца (А. И. Абрамович и др., Л. И. Королева и др., С. Н. Барило и др., В. В. Еременко и др., С. В. Труханов, И. О. Троянчук и др., Е. В. Гомонай и В. М. Локтев). Низкотемпературные фазовые переходы в этих материалах приводят к формированию уникальных свойств — высокотемпературной сверхпроводимости (купраты) и колоссального отрицательного магнитосопротивления (манганаты). Ранее (см., например, [13]) сообщалось об аналогии полевых зависимостей МС в этих соединениях ниже температуры фазового перехода. В настоящем выпуске анализируется влияние замещений редкоземельных элементов на величину спонтанной и вынужденной магнитострикции в рамках моделей двойного обмена и разделения фаз, а также связь необратимой МС с взаимодействиями между магнитной и кристаллической структурами.

Особое внимание в представленных материалах уделяется технике низкотемпературных магнитострикционных измерений и достоверности полученных результатов.

Надеемся, что специальный выпуск окажется полезным и будет стимулировать дальнейшее развитие низкотемпературных МС исследований.

Выражаем признательность за помощь и ценные советы при подготовке настоящего выпуска ФНТ А. Б. Безносову, Н. Ф. Харченко, Е. Н. Хацько, Н. Н. Македонской, Ю. А. Шабакаевой, М. Р. Дж. Гиббсу, Г. Шимчаку и всем авторам.

Мы также благодарим NATO ASI «Modern Trends in Magnetostriction Study and Applications» [14], грант NATO No. PSI-ASI 975527 за предоставленную возможность обсудить рассматриваемые в этом выпуске проблемы низкотемпературной МС.

*В. В. Еременко, В. А. Сиренко*

1. J. P. Joule, *Phil. Mag.* **30**, 76 (1947).
2. A. E. Clark, B. F. DeSavage, and R. M. Bozorth, *Phys. Rev.* **A138**, 216 (1965).
3. E. R. Callen and H. B. Callen, *Phys. Rev.* **A139**, 455 (1965).
4. D. C. Jiles, *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 2nd edition, Chapman and Hall, New York (1998).
5. E. Du Tremolet de Lacheisserie, *Magnetostriction. Theory and Applications of Magnetoelasticity*, CRC Press Inc., USA (1993).
6. O. Yamada and E. Du Tremolet de Lacheisserie, *J. Phys. Soc. Jpn.* **53**, 729 (1984).
7. Л. Д. Ландау и А. М. Лифшиц, *Электродинамика сплошных сред*, Наука, Москва (1986).
8. M Shimizu, *Theory of Magnetoelasticity in Metals and Alloys*, in: *Proc. 3d Intern. Conf. on the Phys. of Magn. Materials*, H. K. Lachkowitz (ed.), World Scientific, Singapore (1986).
9. B. S. Chandrasekhar, *Phys. Lett.* **11**, 331 (1963).
10. К. П. Белов, *Явления магнитоэластики и их техническое применение*, Наука, Москва (1987).
11. A. E. Clark, *Magnetostrictive Rare Earth-Fe<sub>2</sub> Compounds*, in: *Ferromagnetic Materials 1*, E. P. Wohlfarth (ed.), North Holland, Amsterdam (1980).
12. R. Abbundi and A. E. Clark, *IEEE Trans. on Magnetics (MAG13)*, 1519 (1977).
13. V. Eremenko, V. Sirenko, H. Szymczak, and A. Nabialek, *Low Temperature Phys.* **25**, 225 (1999).
14. V. V. Eremenko, V. A. Sirenko, M. R. J. Gibbs, H. Szymczak, *Low Temperature Phys.* **26**, 865 (2000), [*Fizika Nizkikh Temperatur* **26**, 1166 (2000)].