

## АНОМАЛИИ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В ОБЛАСТИ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ СПЛАВАХ И СОЕДИНЕНИЯХ

Никитин С.А.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет,  
119992, Москва, Россия

В работе обобщаются результаты исследования аномалий физических свойств в области магнитных фазовых переходов в редкоземельных (РЗ) сплавах и соединениях типа  $R_xR_{1-x}$ ,  $R_xY_{1-x}$ ,  $R(Fe,Co)_{11}Ti$ ,  $R_2(Fe,Co)_{14}B$  и др.

Главное внимание уделяется изучению магнитоупругих и магнитотепловых свойств в области магнитных фазовых переходов. Данные по магнитострикции парапроцесса представляют значительный интерес для определения природы магнитных фазовых переходов, поскольку объемная магнитострикция прямо связана с первой производной термодинамического потенциала по давлению, а линейная магнитострикция парапроцесса - с первыми производными термодинамического потенциала по компонентам тензора напряжений. Изучение магнитокалорического эффекта (МКЭ) и намагниченности в области магнитных фазовых переходов дает информацию о магнитной части энтропии.

В РЗ материалах наблюдается три типа магнитных фазовых переходов:

- 1) переходы из парамагнитного состояния в магнитоупорядоченное (в ферро- или антиферромагнитное), где можно выделить фазовые переходы первого и второго рода;
- 2) переходы из одного магнитоупорядоченного состояния в другое;
- 3) спин-переориентационные переходы (СПП).

Каждый из этих переходов сопровождается аномалиями физических свойств (намагниченности, магнитострикции, теплового расширения, МКЭ, теплоемкости и др.)

Вблизи температуры Кюри обнаружен максимум линейной и объемной магнитострикции, обусловленный интенсивным парапроцессом - возрастанием истинной намагниченности под действием магнитного поля. Значение магнитострикции парапроцесса позволяют определить зависимость обменных параметров от межатомных расстояний и объема элементарной ячейки. Магнитные фазовые переходы в сильно анизотропных ферромагнетиках в присутствии сильного магнитного поля существенно различаются по характеру вблизи температуры Кюри в зависимости от ориентации магнитного поля по отношению кристаллическим осям. В этом случае при теоретическом описании магнитных фазовых переходов необходимо учитывать, что параметр порядка имеет несколько компонент в отличие от изотропного случая. Это приводит к тому, что характер температурной и полевой зависимости магнитоупругих эффектов (магнитострикции, изменения намагниченности с давлением, модулей упругости, теплового расширения), а также магнитотепловых эффектов (магнитокалорического эффекта и магнитной части энтропии) сильно различаются, что указывает на изменение характера магнитного упорядочения в магнитном поле вдоль легкой и трудной оси намагничивания.

Как показывают наши измерения, магнитострикция и магнитострикционные константы имеют максимальные значения вблизи температуры магнитного фазового перехода, где наибольший вклад в намагниченность дает парапроцесс. Вклад процессов вращения и смещения доменных границ в магнитострикцию незначителен в исследованном интервале температур. Проведенный расчет магнитострикционных констант показывает, что анизотропные одноионные вклады в индуцированную полем магнитострикцию сравнимы по величине с изотропными двухионными обменными вкладами. Отсутствие насыщения на

кривых  $\lambda(H)$  в поле вдоль оси легкого намагничивания, как вблизи температуры Кюри, так и при более низких температурах, можно объяснить тем, что эффективное обменное поле заметным образом изменяют зонную структуру.

В работе также рассматриваются спин-переориентационные переходы в редкоземельных интерметаллических соединениях  $R(\text{Fe,Co})_{11}\text{Ti}$  и  $R_2(\text{Fe,Co})_{14}\text{B}$ . Эти переходы обусловлены переориентацией вектора намагниченности относительно кристаллических осей при изменении температуры и магнитного поля. Данные соединения являются хорошими модельными объектами, поскольку в них можно выделить две магнитные подрешетки, состоящие из РЗ и 3d-ионов.

С целью изучения СПП и их трансформации при изменении температуры и магнитного поля получены данные о полевых и температурных зависимостях намагниченности, константах магнитной анизотропии и магнитострикции. В результате было установлено наличие СПП следующих основных типов:

- 1) СПП, обусловленные образованием угловых структур;
- 2) индуцированные полем СПП, происходящие вследствие переброса вектора спонтанной намагниченности под действием магнитного поля из одного минимума энергии анизотропии в другой;
- 3) Спонтанные СПП, индуцированные изменением температуры.

Обнаружены аномалии намагниченности, магнитострикции и теплового расширения в области СПП, связанные с изменением ориентации вектора намагниченности относительно кристаллических осей.

Трансформация магнитных структур в РЗМ и их сплавах при переходах парамагнетизм – спиральный антиферромагнетизм - ферромагнетизм оказывает сильное воздействие на МКЭ и объемную магнитострикцию  $\omega$ . Резкий рост МКЭ и  $\omega$  сопровождается фазовым переходом из антиферромагнитной фазы в ферромагнитную и промежуточную неколлинеарную структуру. Исчезновение скачков этих величин при некоторой повышенной температуре позволяет определить трикритическую точку на магнитной фазовой диаграмме. Из полученных экспериментальных данных можно сделать заключение об определяющей роли магнитоупругих взаимодействий в переходе геликоидальной антиферромагнетизм-ферромагнетизм в РЗМ и их сплавах. Установлена корреляция между величинами МКЭ и  $\omega$ .

В работе также рассматриваются эластокалорические эффекты в РЗМ и их соединениях в области магнитных фазовых переходов. Данные эффекты позволяют получить информацию о зависимости обменных параметров от межатомных расстояний. Показано, что величина этого эффекта пропорциональна коэффициенту теплового расширения. Вследствие значительных изменений линейных размеров РЗ магнетиков при магнитных фазовых переходах величина эластокалорического эффекта достигает высоких значений. Обсуждаются перспективы использования магнитоупругих и магнитокалорических эффектов для технических применений.

Работа поддержана грантом РФФИ № 05-02-16361 и Федеральной программой поддержки ведущих научных школ грант НШ-205.2003.2.