

УДК 537.62

ВЛИЯНИЕ МНОГОДОМЕННОГО СОСТОЯНИЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА В МАЛЫХ ПОЛЯХ

Ю.Д. Орлов¹, А.Г. Хохолков²

Тверской государственный университет,

¹кафедра общей физики, ²кафедра магнетизма

Для интерпретации экспериментальных температурных зависимостей намагниченности на базе метода фаз Нееля разработана универсальная модель расчета температурного хода намагниченности материалов с различным типом магнитокристаллической анизотропии, позволяющая описать в рамках единого подхода поведение ферромагнетиков в области спин-переориентационных переходов и фазового перехода порядок–беспорядок.

Полученные ранее экспериментальные данные о температурных зависимостях магнитной восприимчивости позволяют утверждать, что их вид в области перехода в парамагнитное состояние существенно различается для соединений с многоосной и одноосной магнитокристаллической анизотропией (МКА) и не зависит от типа кристаллической структуры [1].

Известно, что в области малых магнитных полей существенное влияние на процессы намагничивания образца оказывает развитая магнитная доменная структура (ДС). Для учета влияния ДС применялся метод фаз Нееля [2], детально разработанный для вычисления кривых намагничивания и начальной магнитной восприимчивости одноосных ферромагнетиков в [3]. В методе фаз принимается, что в отсутствие внешнего магнитного поля векторы самопроизвольной намагниченности в отдельных областях кристалла расположены вдоль направлений \mathbf{n}_i , совпадающих с направлениями легкого намагничивания. Характер распределения таких областей в кристалле, как и энергия доменных границ, не учитывается. Доменная структура при таком подходе характеризуется числом магнитных фаз, которое определяется числом направлений легкого намагничивания в кристалле. При этом i -я магнитная фаза характеризуется соответствующим объемом v_i , который определяется как относительный суммарный объем всех доменов, намагниченных параллельно направлению \mathbf{n}_i так, что при отсутствии внешнего магнитного поля

$$\sum_i \mathbf{n}_i v_i = 0 \text{ и } \sum_i v_i = 1. \quad (1)$$

При наличии внешнего магнитного поля компонента намагниченности монокристалла I_n вдоль направления \mathbf{n} определяется как

$$I_n = I_s \sum_i v_i \mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}. \quad (2)$$

Энергия ферромагнитного монокристалла с учетом доменной структуры может быть записана в виде

$$\hat{A} = \sum_{i=1}^n (K_1 \cdot \sin^2 \varphi_i + K_2 \cdot \sin^4 \varphi_i) \cdot v_i - \mathbf{IH} + \frac{NI^2}{2}, \quad (3)$$

где φ_i – угол между вектором намагниченности и кристаллографической c -осью в i -й фазе, n – число фаз, v_i – объем i -й фазы, I – вектор суммарной намагниченности монокристалла, \mathbf{H} – вектор напряженности внешнего магнитного поля, K_1 и K_2 – константы магнитокристаллической анизотропии, N – размагничивающий фактор. При этом

$$\mathbf{IH} = I_H H = H(I_x \sin \theta + I_y \cos \theta), \quad (4)$$

$$I_x = \sum_i I_{xi} v_i = \sum I_s v_i \sin \varphi_i, \quad (5)$$

$$I_y = \sum_i I_{yi} v_i = \sum I_s v_i \cos \varphi_i. \quad (6)$$

Значение угла φ определяется из условия минимума энергии E . Варьируя параметр H при неизменных K_1 , K_2 , θ и I_s , можно построить кривую намагничивания монокристалла. Так как K_1 , K_2 и I_s являются функциями температуры, то, зная зависимости $K_1(T)$, $K_2(T)$ и $I_s(T)$, можно построить температурную зависимость $I(T)$ в заданном поле.

Аналитические формулы, полученные для расчета кривых намагничивания и температурных зависимостей магнитной восприимчивости в рамках метода фаз Нееля [3], не применимы в случае МКА с метастабильными состояниями. Численное решение данной задачи позволяет описать в рамках единого подхода зависимости $I(T)$ магнетика с любым типом МКА.

Анализ результатов [3] для магнитной восприимчивости ферромагнетика с анизотропией типа «ось легкого намагничивания» дает условие возрастания восприимчивости при увеличении температуры:

$$\frac{dI_s}{I_s} > \frac{1}{2} \frac{dK_1}{K_1} \Leftrightarrow \frac{dI_s}{dT} > \frac{I_s}{2K_1} \frac{dK_1}{dT}. \quad (7)$$

Таким образом, температурное поведение намагниченности в малых полях зависит от взаимной динамики изменения констант магнитокристаллической анизотропии и спонтанной намагниченности ферромагнетика с изменением температуры.

На рис. 1 приведены температурные зависимости намагниченности ферромагнетика с анизотропией «ось легкого намагничивания», рассчитанные для различных температурных зависимостей константы магнитокристаллической анизотропии K_1 . Индексы 1...5 указывают на значения константы K_1 при $T = T_c$: $K_1(1) = 1 \cdot 10^6$ эрг/см³, $K_1(2) = 5 \cdot 10^5$ эрг/см³, $K_1(3) = 1 \cdot 10^5$ эрг/см³, $K_1(4) = 1 \cdot 10^4$ эрг/см³, $K_1(5) = 0$.

Из данных рис. 1 видно, что значение константы анизотропии вблизи температуры Кюри оказывает существенное влияние на температурные зависимости намагниченности в малых магнитных полях, при этом в поле, приложенном вдоль оси легкого намагничивания монокристалла (рис. 1, а),

вид температурной зависимости не зависит от динамики изменения констант магнитокристаллической анизотропии.

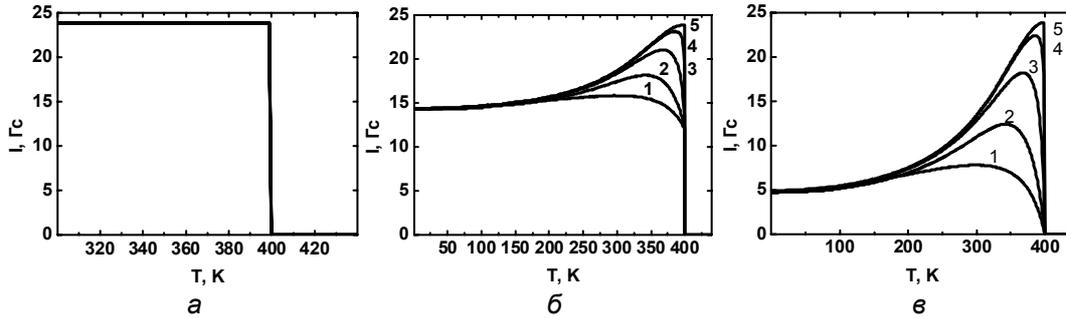


Рис. 1. Температурные зависимости намагниченности для различных констант анизотропии в поле 100 Э. Угол между внешним полем и осью c кристалла: 0 (а), 45 (б) и 90° (в)

Предложенная модель также позволяет описать поведение температурных зависимостей намагниченности магнетика в области спин-переориентационных фазовых переходов, измеренных в малых полях. При этом возможно разделение вкладов в намагниченность: вклада от вращения вектора намагниченности в магнитных фазах и вклада от изменения относительных объемов фаз.

Объяснение причины появления наблюдаемого при T_c резкого максимума на температурных зависимостях магнитной восприимчивости соединений с анизотропией типа «ось легкого намагничивания» [1] может быть получено при учете парапроцесса, или истинного намагничивания (компенсации температурных флуктуаций самопроизвольной намагниченности внешним магнитным полем), особенно сильного вблизи температуры Кюри. В качестве первого приближения при этом можно использовать классическую теорию Вейсса, в соответствии с которой намагниченность насыщения ферромагнетика при температуре T во внешнем магнитном поле H может быть численно получена из уравнения

$$\ln \frac{1+y}{1-y} = \frac{2T_c}{T} y + \frac{2m_0 H}{kT}. \quad (8)$$

Здесь $k = 1.38054 \cdot 10^{-16}$ эрг·К⁻¹ – постоянная Больцмана, m_0 – магнитный момент узла кристаллической решетки (при расчетах использовалось значение $m_0 = m_{Fe} = 2\mu_B$, где $\mu_B = 9.2732 \cdot 10^{-21}$ эрг·Гс⁻¹ – магнетон Бора), $y = \frac{I_s(T, H)}{I_s(0, 0)}$ – относительная намагниченность.

Восприимчивость парапроцесса может быть вычислена как производная функции (8) по магнитному полю H .

Соответственно намагниченность парапроцесса в поле H будет определяться как

$$I^{para} = \int_0^H \chi dH. \quad (9)$$

Учитывая, что внутреннее поле в образце при наличии доменной структуры отличается от внешнего, намагниченность i -й магнитной фазы можно представить в виде

$$\begin{aligned} I_{xi} &= I_s \sin \varphi_i + I_x^{para}, \\ I_{yi} &= I_s \cos \varphi_i + I_y^{para}, \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} I_x^{para} &= \int_0^{H_{ix}} \chi dH, \\ I_y^{para} &= \int_0^{H_{iy}} \chi dH, \end{aligned} \quad (11)$$

и

$$\begin{aligned} H_{ix} &= H_x - NI_x, \\ H_{iy} &= H_y - NI_y. \end{aligned} \quad (12)$$

Используя (8)–(12) при решении (3)–(6), можно учесть влияние парапроцесса на температурную зависимость намагниченности анизотропного ферромагнетика с учетом наличия в образце доменной структуры. На рис. 2 приведены рассчитанные температурные зависимости намагниченности ферромагнетика с анизотропией типа «ось легкого намагничивания» вблизи температуры Кюри в магнитном поле 100 Э при различных значениях константы магнитокристаллической анизотропии K_1 в T_c : $K_1(1) = 1 \cdot 10^6$ эрг/см³, $K_1(2) = 1 \cdot 10^5$ эрг/см³, $K_1(3) = 1 \cdot 10^4$ эрг/см³.

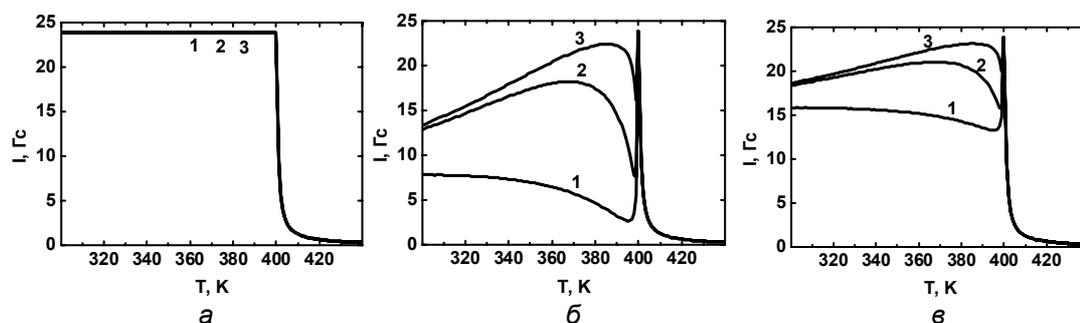


Рис. 2. Температурные зависимости намагниченности для различных констант анизотропии в поле 100 Э в области T_c . Угол между внешним полем и ОЛН: 0 (а), 45 (б) и 90° (в)

На рис. 3 представлены рассчитанные температурные зависимости намагниченности ферромагнетика с анизотропией типа «ось легкого намагничивания» в полях 100, 500 и 1000 Э при различных значениях константы K_1 при температуре Кюри.

Анализ полученных результатов показывает, что с уменьшением значения $K_1(T_c)$ и угла между внешним полем и ОЛН относительная величина пика на температурных зависимостях намагниченности уменьшается. Также при этом уменьшается величина магнитного поля, необходимого для исчезновения пика на температурной зависимости. Вид температурной зависимости в случае малых полей для ферромагнетика с анизотропией типа «легкий конус» аналогичен зависимости на рис. 2, а и не зависит ни от величины констант анизотропии, ни от ориентации образца относительно направления внешнего поля.

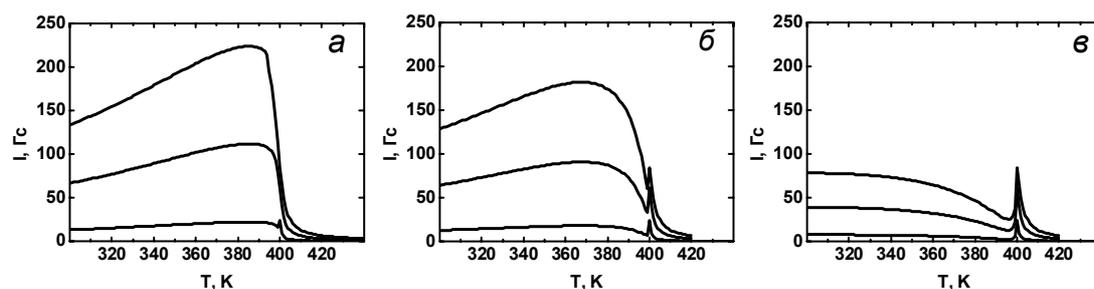


Рис. 3. Температурные зависимости намагниченности в полях 100, 500 и 1000 Э для угла 90° между внешним полем и ОЛН. Значения констант анизотропии в области T_c : $K_1 = 1 \cdot 10^4$ (а); $1 \cdot 10^5$ (б); $1 \cdot 10^6$ эрг/см³ (в)

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что наличие или отсутствие острого максимума в температуре Кюри (обусловленного вкладом парапроцесса в намагничивание) на температурной зависимости намагниченности зависит от типа МКА соединения, значения внешнего поля и его ориентации относительно оси c монокристалла.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (проект НШ-205.2003.2) и грантов РФФИ № 05-02-17197 и 05-02-16361.

Список литературы

1. Хохолков А.Г., Грушичев А.Г. Температурные зависимости магнитной восприимчивости соединений Y_2Fe_{17} , Y_6Fe_{23} , YFe_2 , $R_2Fe_{14}B$ ($R=Y, Nd, Sm$), $R_3Fe_xTi_3$ ($R=Y, Gd$; $x=34, 33, \dots, 24$) вблизи температуры Кюри // Вестник ТвГУ. Сер. Физ. 2004. Вып. 1. № 4(6). С. 50–53.
2. Neel L. Les lois de l'aimantation et de subdivision en domaines elementaires d'un monocristal de fer (I) // J. de Phys. Radium. 1944. V. 5. P. 241–251.
3. Kronmuller H., Trauble H., Seeger A., Boser O. Theorie der Anfangssuszeptibilitat und der Magnetisierungskurve von hexagonalen Kobalt-Einkristallen // Mater. Sci. Eng. 1966. V. 1. P. 91–109.