

УДК 538.245

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ КУБИЧЕСКИХ МАГНЕТИКОВ

С.С. Смирнов, М.Б. Ляхова, Ю.Г. Пастушенков, К.П. Скоков

Кафедра магнетизма

В рамках теории фаз Нееля проведено моделирование кривых намагничивания кубических магнетиков. Определены основные особенности хода кривых в различных кристаллографических направлениях. Получено хорошее согласие модельных кривых с экспериментальными данными.

В настоящее время накоплен огромный экспериментальный материал о магнитных свойствах и процессах перемагничивания магнетиков различных типов. Однако для объяснения ряда особенностей кривых намагничивания образцов с различным типом кристаллической структуры и магнито-кристаллической анизотропии (МКА) требуется привлечение компьютерных методов моделирования кривых. В данной работе создана компьютерная программа для расчетов кривых намагничивания кубических кристаллов методом фаз Нееля [1].

В свободной энергии образца учитываются три вклада: энергия анизотропии, энергия собственного размагничивающего поля и энергия во внешнем магнитном поле. Кривая намагничивания $I_H(H)$ рассчитывается посредством определения объемов фаз и направлений намагниченности для каждого значения поля H . Алгоритм построения кривых основан на использовании принципа минимизации полной энергии. Компьютерная программа позволяет задавать значения магнитных констант образца (I_S ; K_1 ; K_2), направление и шаг изменения поля, сохранять результаты расчетов в виде графиков и таблиц.

Для исследования влияния формы образца на ход кривых намагничивания были рассчитаны зависимости $I_H(H)$ в трех основных кристаллографических направлениях $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ при различных значениях размагничивающего фактора N . Анализ показал, что с увеличением N угол наклона начального линейного участка модельных кривых к оси поля H уменьшается, а их форма сохраняется. В связи с этим остальные кривые были построены для сферических образцов с $N=4, 19$. Кроме того, было обнаружено, что разница в ходе кривых намагничивания в различных кристаллографических направлениях существенным образом зависит от соотношения значений размагничивающего фактора N , намагниченности насыщения I_S и констант МКА. В конечном итоге разница в ходе кривых вдоль легчайшего и труднейшего направлений зависит от соотношения между значениями полей насыщения. Вдоль оси легкого намагничивания (ОЛН) это поле равно размагничивающему $H_0=N \cdot I_S$, а вдоль оси трудного намагничивания (ОТН) – полю анизотропии.

На рис. 1 и 2 приведены модельные кривые намагничивания для случая $K_1 > 0$ и $K_2 > 0$, когда в кубическом магнетике имеются три оси легкого намагничивания типа $\langle 100 \rangle$, а трудными направлениями намагничивания являются $\langle 111 \rangle$.

Видно, что вдоль легкого направления $\langle 100 \rangle$ насыщение достигается по линейной зависимости во внешнем поле, равном собственному размагничивающему полю образца.

Кривые намагничивания вдоль направлений $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ имеют ряд особенностей. Кривые состоят из двух участков: линейного и нелинейного. Для всех кристаллографических направлений и любых положительных констант анизотропии линейные участки зависимостей $I_H(H)$ полностью совпадают. Нелинейные участки кривых $I_H(H)$ начинаются в одной точке, положение которой зависит только от направления намагничивания. Эти точки соответствуют значению намагниченности $I = 0,71 \cdot I_S$ для направления $\langle 110 \rangle$ и $I = 0,59 \cdot I_S$ для направления $\langle 111 \rangle$.

Для случаев $K_1 > K_2$ кривые вдоль направлений $\langle 111 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ пересекаются, причем в меньших полях зависимости $I_H(H)$ вдоль трудной оси $\langle 111 \rangle$ идут ниже. В случае, когда значения K_1 и K_2 равны между собой, кривые достигают насыщения в одном поле. При $K_1 < K_2$ кривая намагничивания вдоль $\langle 111 \rangle$ идет ниже во всем интервале полей.

При анализе зависимостей $I_H(H)$ вдоль направлений $\langle 100 \rangle$; $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ от значений констант анизотропии было установлено следующее.

Вдоль легкой оси $\langle 100 \rangle$ кривые намагничивания всегда полностью совпадают (рис. 1). Ход кривых вдоль $\langle 110 \rangle$ определяется значением только первой константы МКА, т. е. при постоянном значении K_1 и широком варьировании значения K_2 кривые совпадают друг с другом (рис. 1). Оказалось, что вторая константа анизотропии существенно изменяет наклон кривых намагничивания вдоль трудной оси $\langle 111 \rangle$ в больших полях. С увеличением K_2 растет поле насыщения, т. е. поле анизотропии (рис. 2).

На рис. 3 и 4 представлены кривые намагничивания для случая $K_1 < 0$ и $K_2 < 0$, когда в кубическом магнетике имеются четыре ОЛН типа $\langle 111 \rangle$, а трудными осями намагничивания являются $\langle 100 \rangle$.

Анализ показал, что вдоль легкого направления $\langle 111 \rangle$ насыщение достигается по линейной зависимости в поле, равном размагничивающему полю образца.

Кривые намагничивания вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ также имеют ряд особенностей. Они состоят из линейного и нелинейного участков. Для всех кристаллографических направлений и любых отрицательных констант K_1 и K_2 линейные участки зависимостей $I_H(H)$ полностью совпадают. Нелинейные участки кривых $I_H(H)$ начинаются в одной точке, положение которой зависит только от направления намагничивания. Эти точки соответствуют значениям намагниченности $I = 0,82 \cdot I_S$ для направления $\langle 110 \rangle$ и $I = 0,59 \cdot I_S$ для направления $\langle 100 \rangle$.

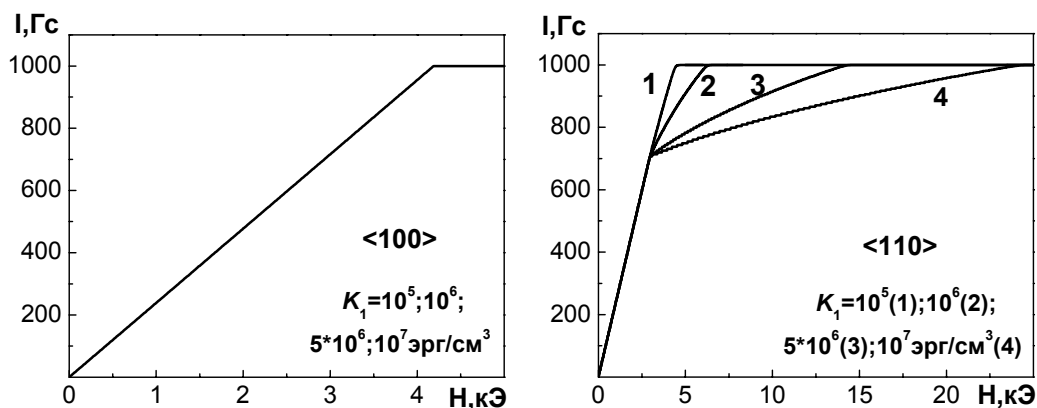


Рис. 1. Кривые намагничивания кубических кристаллов с $K_1 > 0$

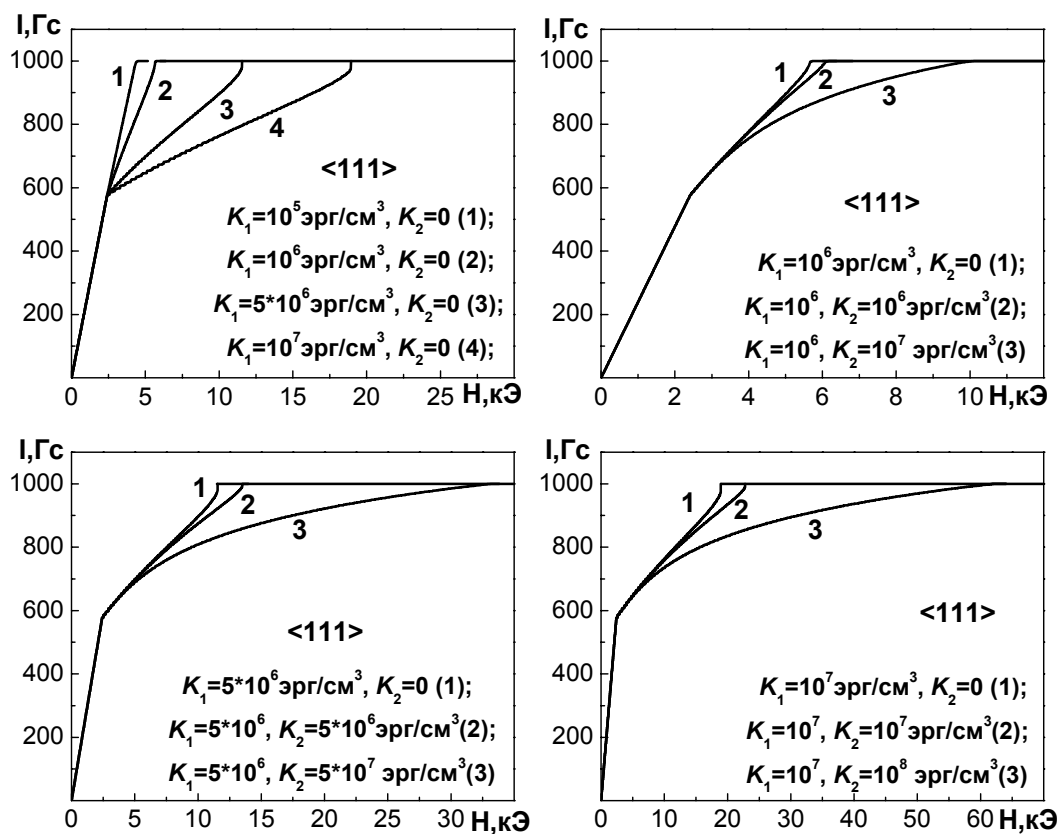


Рис. 2. Кривые намагничивания кубических кристаллов с $K_1 > 0$

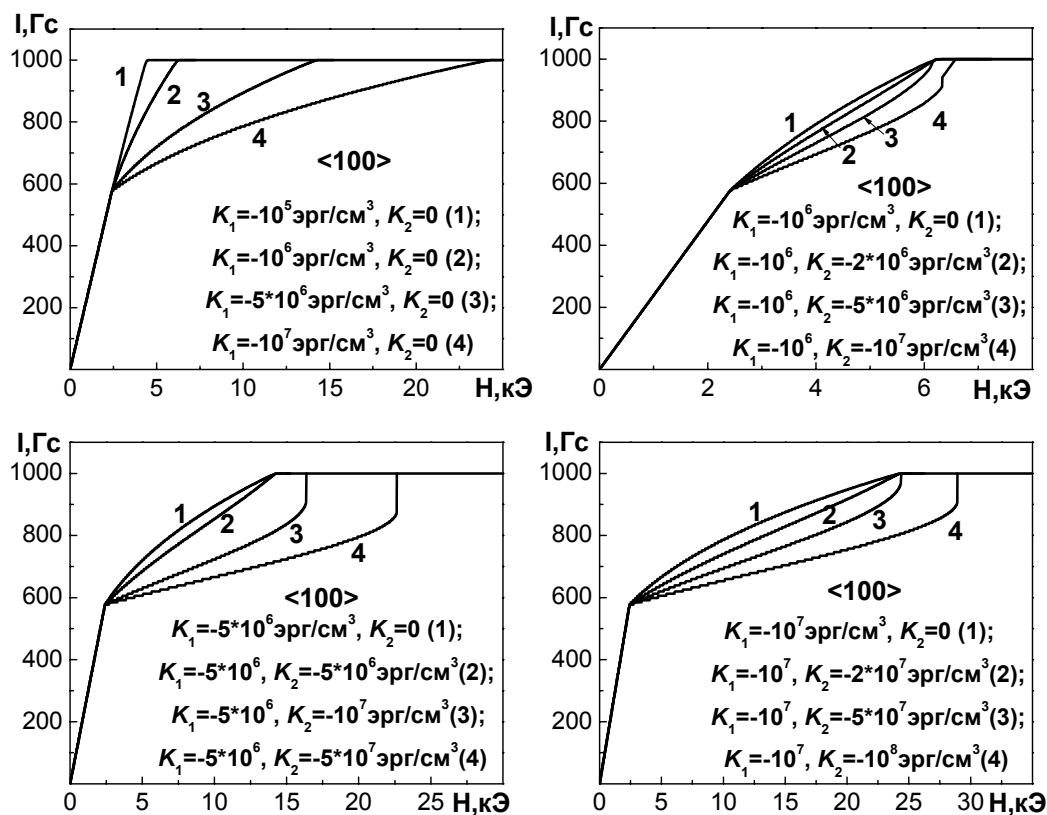


Рис. 3. Кривые намагничивания кубических кристаллов с $K_1 < 0$

Кривые намагничивания вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ пересекаются, если абсолютное значение первой константы анизотропии мало по сравнению со второй, но в малых полях зависимости $I_H(H)$ вдоль трудной оси $\langle 100 \rangle$ идут ниже. В случае, когда $|K_1| = |K_2|/2$, кривые достигают насыщения в одном поле. При $|K_1| > |K_2|/2$ кривые намагничивания вдоль трудной оси $\langle 100 \rangle$ идут ниже во всем интервале полей.

Установлено, что вдоль легкой оси $\langle 111 \rangle$ кривые намагничивания всегда полностью совпадают, а ход кривых намагничивания вдоль осей $\langle 100 \rangle$ и $\langle 110 \rangle$ определяется значениями обеих констант МКА.

При малых $|K_2|$ ход кривых вдоль трудной оси $\langle 100 \rangle$ в основном определяется значением первой константы анизотропии, при варьировании значения K_2 изменяется изгиб кривых, но поля насыщения остаются постоянными (рис. 3). Если $|K_2|$ значительно больше, чем $|K_1|$, то ход кривых существенно изменяется. Во-первых, с ростом $|K_2|$ увеличивается поле анизотропии, во-вторых, в больших полях наблюдается резкое увеличение намагниченности – скачок на зависимостях $I_H(H)$

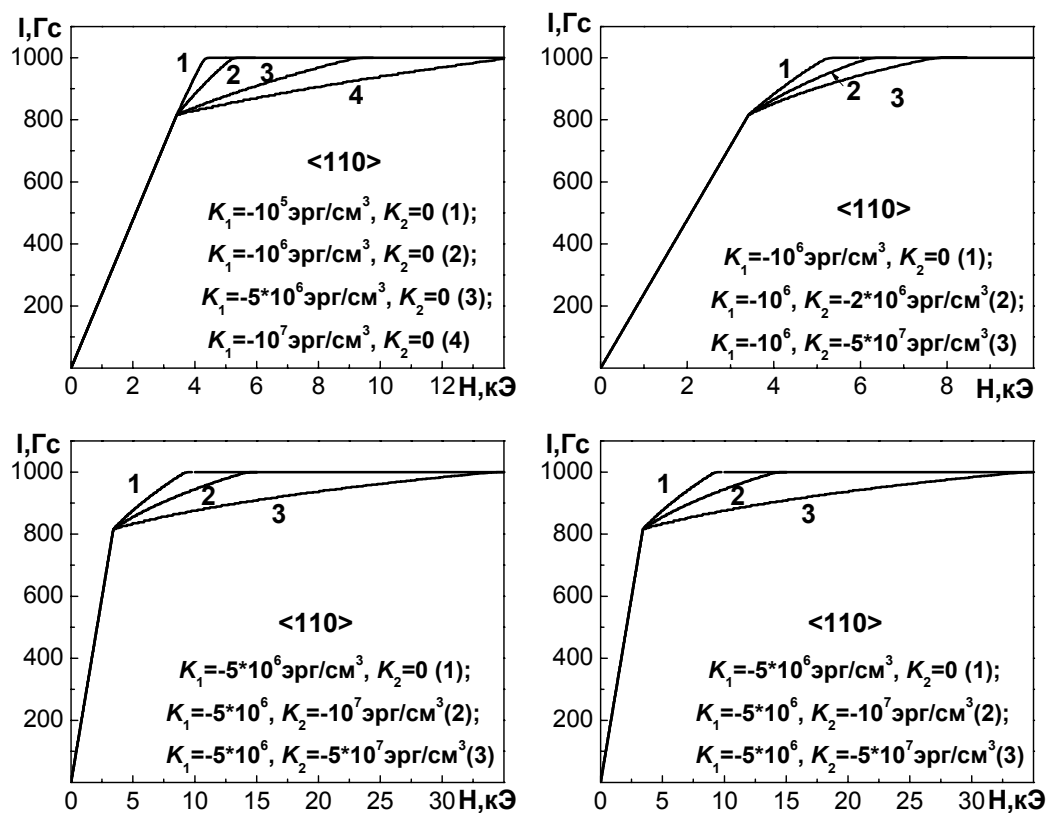


Рис. 4. Кривые намагничивания кубического кристалла $K_1 < 0$

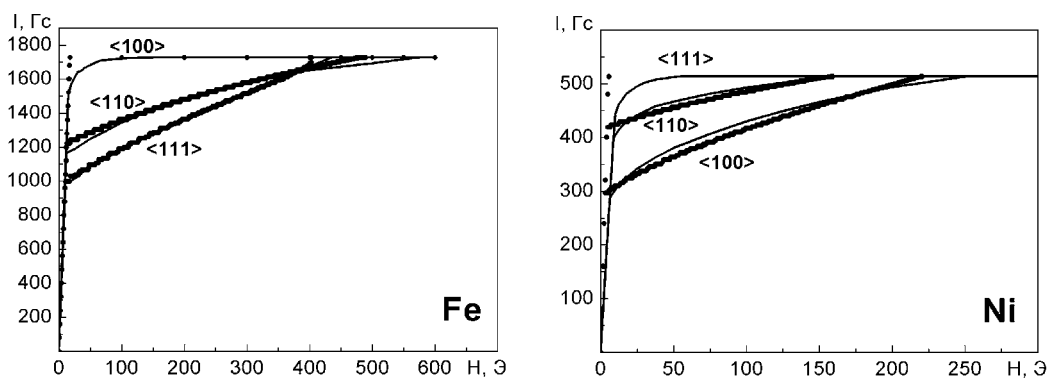


Рис. 5. Модельные (•) и экспериментальные (–) кривые намагничивания образцов железа и никеля вдоль кристаллографических направлений типа $\langle 111 \rangle$; $\langle 110 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$

Ход кривых намагничивания вдоль оси $\langle 110 \rangle$ сильным образом зависит как от первой, так и второй констант МКА (рис. 4). Наклон кривых $I_H(H)$ к оси поля уменьшается с увеличением абсолютных значений $|K_1|$ и $|K_2|$.

Разработанная программа позволила провести анализ характера намагничивания кубических кристаллов, т.е. оценить вклады процессов смещения доменных границ (по изменению относительных объемов магнитных фаз) и процессов вращения векторов намагниченности (по изменению направляющих углов вектора \mathbf{I} в магнитных фазах). Установлено, что начальные линейные участки кривых намагничивания соответствуют процессам смещения доменных границ, а насыщение в больших полях достигается за счет процессов вращения вектора намагниченности.

В [2; 3] приведены кривые намагничивания для монокристаллов железа и никеля, которые имеют различный тип анизотропии. С помощью разработанной программы были построены модельные кривые намагничивания для железа и никеля. Моделирование проводилось следующим образом. Наклон кривых в малых полях подбирался изменением значения размагничивающего фактора N , ход кривой вдоль оси $\langle 110 \rangle$ для железа и вдоль оси $\langle 100 \rangle$ для никеля варьировался величиной K_1 , а вдоль осей $\langle 111 \rangle$ для железа и $\langle 110 \rangle$ для никеля – величиной K_2 . Как видно из рис. 5, удалось получить хорошее совпадение экспериментальных и модельных кривых намагничивания во всех направлениях при следующих характеристиках образцов:

$$N = 0,01; I_S = 1727 \text{ Гс}; K_1 = 4 \cdot 10^5 \text{ эрг/см}^3; K_2 = 2 \cdot 10^5 \text{ эрг/см}^3 \text{ (железо);}$$

$$N = 0,01; I_S = 513 \text{ Гс}; K_1 = -5,5 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^3; K_2 = -4,5 \cdot 10^4 \text{ эрг/см}^3 \text{ (никель).}$$

Значения констант анизотропии, полученные из модельных кривых, близки к экспериментальным данным [2; 3]. Малое значение размагничивающего фактора, по-видимому, соответствует образцам в виде тонких иголок – так называемых «усов».

Таким образом, созданная программа позволяет не только моделировать кривые намагничивания кубических магнетиков, но и определять значения констант анизотропии из известного хода экспериментальных кривых.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №04-02-96705.

Литература

1. Неель Л. Процессы намагничивания и ферромагнитные области монокристаллов железа // Физика ферромагнитных областей. М., 1951. С. 240–283.
2. Вонсовский С.В. Магнетизм. М., 1971.
3. Бозорт Р. Ферромагнетизм. М., 1956.