

Модель магнитного гистерезиса трехосных ферромагнетиков и ее применение в магнитной структурографии

Ничипурук А.П., Розенфельд Е.В., Бида Г.В., Сташков А.Н.



Разработана модель магнитного гистерезиса и найдены в аналитическом виде уравнения полевой зависимости восприимчивости и намагниченности для ансамбля невзаимодействующих кристаллитов (доменов), удовлетворяющих следующим требованиям: кристаллиты обладают кубической симметрией с тремя осями легкого намагничивания; направления осей в пространстве распределены хаотично; в рассмотрение принимаются лишь состояния намагниченности до насыщения вдоль одной из легких осей, переходы между этими состояниями – первого рода. Модель апробирована на сталях различного химического состава, подвергнутых термической и деформационной обработкам.

Нами предложена достаточно простая модель, основанная на моделях Прейзаха и Кондорского, главной отличительной особенностью которой является учет двух типов доменных границ в ферромагнетиках с трехосной магнитной анизотропией, а также энергии случайной наведенной магнитной анизотропии.

Рассмотрим ансамбль невзаимодействующих областей (доменов), каждая из которых имеет три взаимно перпендикулярных лёгких в магнитном отношении оси, которые мы будем обозначать \hat{x} , \hat{y} и \hat{z} . Под H будем понимать проекцию внешнего поля \mathbf{H} на ось h (рис.1).

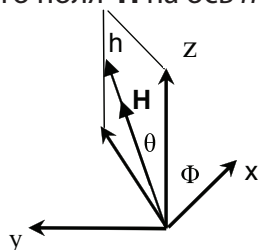


Рис. 1

Определение углов θ и Φ

Будем полагать, что кристаллографическая магнитная анизотропия настолько велика, что в рассматриваемом диапазоне значений H процессами вращения намагниченности доменов можно пренебречь, принимая во внимание лишь скачкообразные изменения их состояний.

В реальных доменах, при прочих равных ус-

ловиях, состояние с намагниченностью, параллельной одной из трёх кристаллографически эквивалентных осей, соответствует наименьшей энергии. Источником этой (дополнительной к кристаллографической) магнитной анизотропии могут являться внутренние напряжения, форма кристаллитов, немагнитные включения и другие причины. Именно эта дополнительная анизотропия стабилизирует 90-градусные доменные стенки, и мы должны учесть её существование в нашей модели. С учетом изначально хаотического распределения в пространстве углов θ и Φ (рис.1) вычисляем намагниченность m как сумму проекций на направление поля магнитных моментов всех N доменов - членов ансамбля:

$$m = \frac{1}{NV I_s} \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i \cdot \mathbf{H}}{H}$$

Вычисление суммы представляет собой интегрирование по всем возможным углам θ и Φ ансамбля, в зависимости от величины поля. Дифференцируя по полю полученное выражение для намагниченности, приходим к дифференциальной восприимчивости. Основным результатом является нахождение (путем сравнения полевых зависимостей экспериментальной и рассчитанной дифференциальной восприимчивости материала) критических полей необратимого смещения 90 и 180-градусных доменных

границ, а также поля наведенной магнитной анизотропии.

Апробацию модели, прежде всего применительно к оценке внутренних напряжений в материалах, провели на образцах стали Ст.3, подвергнутых деформации растяжением с последующими отжигами при разных температурах, стали 30ХГСА после гидроэкструзии на большие степени деформации и сталей Ст.3 и У8 после циклических деформаций в области малоциклового усталости.

В качестве примера, показывающего достаточно высокую степень совпадения расчетных и экспериментальных кривых восприимчивости, на *рис.2* приведена зависимость $\chi_d(H)$ для деформированной проволоки из стали Ст.3. Важным является то, что рассчитанная восприимчивость отражает не только общий ход кривой, но и отдельные нюансы, в данном случае небольшой относительный максимум.

Среди параметров, рассчитываемых в рам-

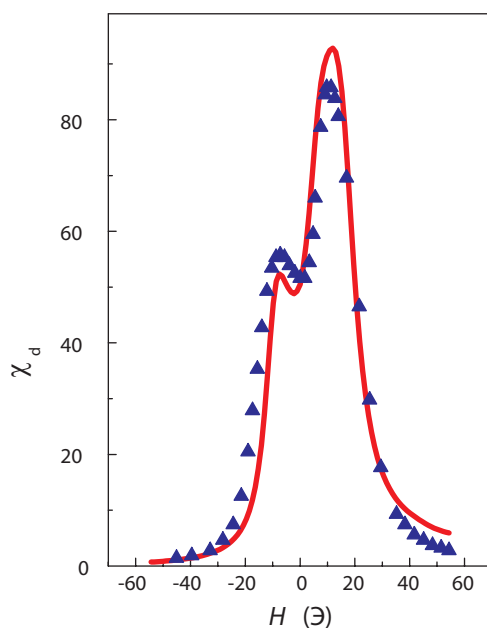


Рис. 2

Зависимость дифференциальной магнитной восприимчивости деформированной проволоки из стали Ст.3 от намагничивающего поля: $\Delta l/l = 10\%$, *треугольники* – эксперимент, *линия* – расчет.

ках модели, наибольший интерес представляет собой поле наведенной анизотропии, обусловленной величиной и градиентами внутренних напряжений. На *рис.3* показана зависимость данной величины от степени пластической деформации образцов стали 30ХГСА, подвергнутых гидроэкструзии.

В отличие от других параметров магнитного гистерезиса, данная характеристика практически линейно связана со степенью пластической деформации и, следовательно, с величиной внутренних остаточных напряжений.

Как указывалось выше, аналогичные зависимости были получены для различных видов пластической деформации и термической обработки на образцах сталей разного химического состава. Во всех случаях обнаружены однозначные связи между полем наведенной магнитной анизотропии и величиной напряжений. Полученные результаты подробно представлены в публикациях [1-4].

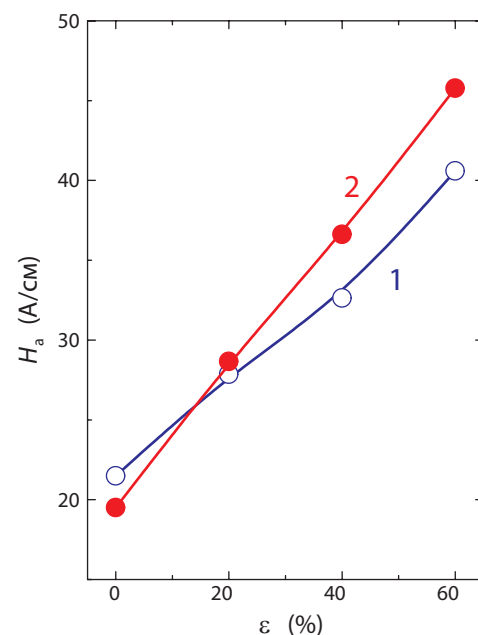


Рис.3

Зависимость поля наведенной магнитной анизотропии от степени пластической деформации: *1* – нормализованное состояние, *2* – изотермическая обработка

¹ Розенфельд Е.В., Ничипурук А.П. ФММ, 1997, т.84, вып.б., с. 29-46.

² Ничипурук А.П., Дегтярев М.В., Горкунов Э.С., Чащухина Т.И., Воронова Л.М., Давыдова Л.С. Дефектоскопия, 2001, №1, с. 32-37.

³ Ничипурук А.П., Бида Г.В., Янковский П.В.. Дефектоскопия, 2002, № 7, с. 52-59.

⁴ Бида Г.В., Ничипурук А.П., Камардин В.М., Сташков А.Н. Дефектоскопия, 2005, № 6, с.75-89.