

01;05

Механическая модель для исследования феноменологических свойств материалов с доменной структурой

© А.Т. Овакимян

Ереванский НИИ оптико-физических измерений

Поступило в Редакцию 13 августа 2001 г.

Рассмотрена модель, аналогичная применяемой в механике, для исследования процессов намагничивания магнитных материалов и электризации сегнетоэлектриков. Обосновывается возможность ее реализации в природе.

Возможность применения аналогичной применяемой в механике (в дальнейшем механической) модели для имитации процессов намагничивания магнитных материалов вытекает из следующего положения: поскольку магнитное поле (МП) векторно, то результирующий магнитный момент \mathbf{M} равен сумме магнитных моментов доменов \mathbf{m}_i , которые в свою очередь слагаются из магнитных моментов элементарных источников магнетизма [1].

Например, для однородного ферромагнитного монокристалла, намагниченного во внешнем МП до насыщения, когда все магнитные моменты доменов параллельны и направлены в одну сторону (рис. 1), в ту же сторону будет направлен \mathbf{M} , приложенный в точке C_m , совпадающей с геометрическим центром монокристалла.

Если перемагнитить кристалл до насыщения в любом другом направлении, то соответственно поменяется направление \mathbf{M} , а положение точки C_m останется неизменным, что вытекает из свойств параллельных векторов.

При отсутствии или слабом внешнем МП кристалл разобьется на домены, причем обязательно так, чтобы положение точки C_m относительно кристалла оставалось неизменным, в противном случае будет нарушаться закон сохранения энергии [2].

Действительно, если указанный кристалл подвесить за центр масс в неизменяющемся внешнем МП и привести во вращение, то в нем начнутся процессы смещения и вращения доменов. При этом, если

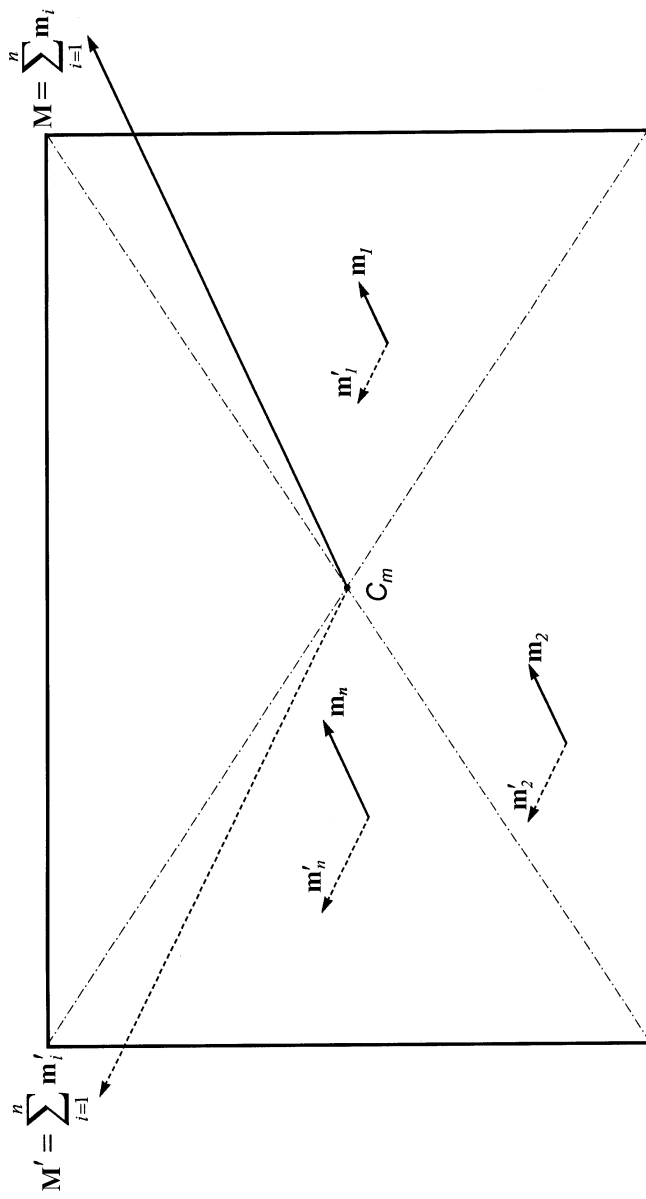


Рис. 1.

каждый раз магнитные моменты доменов будут располагаться так, что точка C_m будет смещаться, то кристалл будет испытывать механические вращающие моменты относительно точки подвеса, а значит постоянно вращаться в неизменяющемся МП, что невозможно.

Координаты точки C_m легко определяются из предельного случая, когда однородный кристалл намагничен до насыщения, — они совпадают с координатами геометрического центра (центра масс) кристалла.

К аналогичному выводу можно прийти и исходя из свойств дипольности, для чего будем считать сторону кристалла, куда направлен \mathbf{M} , северным полюсом, а противоположную соответственно южным (на рис. 2 соответственно N и S). Свойство дипольности предполагает, что мы не можем намагничивать один полюс больше, чем другой. Причем это должно быть справедливо для любого направления намагничивания. А это возможно лишь в том случае, если \mathbf{M} будет представлять собой связанный вектор, всегда приложенный в геометрическом центре кристалла.

Именно такое свойство результирующего вектора в совокупности с гистерезисом, создающим устойчивое его направление для постоянных магнитов, и может восприниматься внешним наблюдателем как свойство дипольности.

Подобный вывод можно распространить на любые твердые тела, имеющие доменную структуру и обладающие дипольными свойствами.

Это возможно, если считать, что эти тела представляют собой взаимосвязанную систему, в которой ориентация доменов коррелируется, превращая весь объем образца в самоорганизующуюся систему. Указанное должно быть справедливо как для поликристаллических, так и для аморфных твердых тел.

В концептуальном плане это можно обосновать следующими двумя способами:

— магнитные моменты элементарных источников магнетизма ведут себя так, что в результате их любой переориентации выполняется закон сохранения энергии;

— закон сохранения энергии требует, чтобы элементарные источники магнетизма вели себя именно таким образом.

Для экспериментального подтверждения неподвижности точки C_m целесообразно использовать следующую схему:

— изготавливается площадка тонкой ферромагнитной пленки такого размера, чтобы она полностью вмещалась в поле зрения установки для

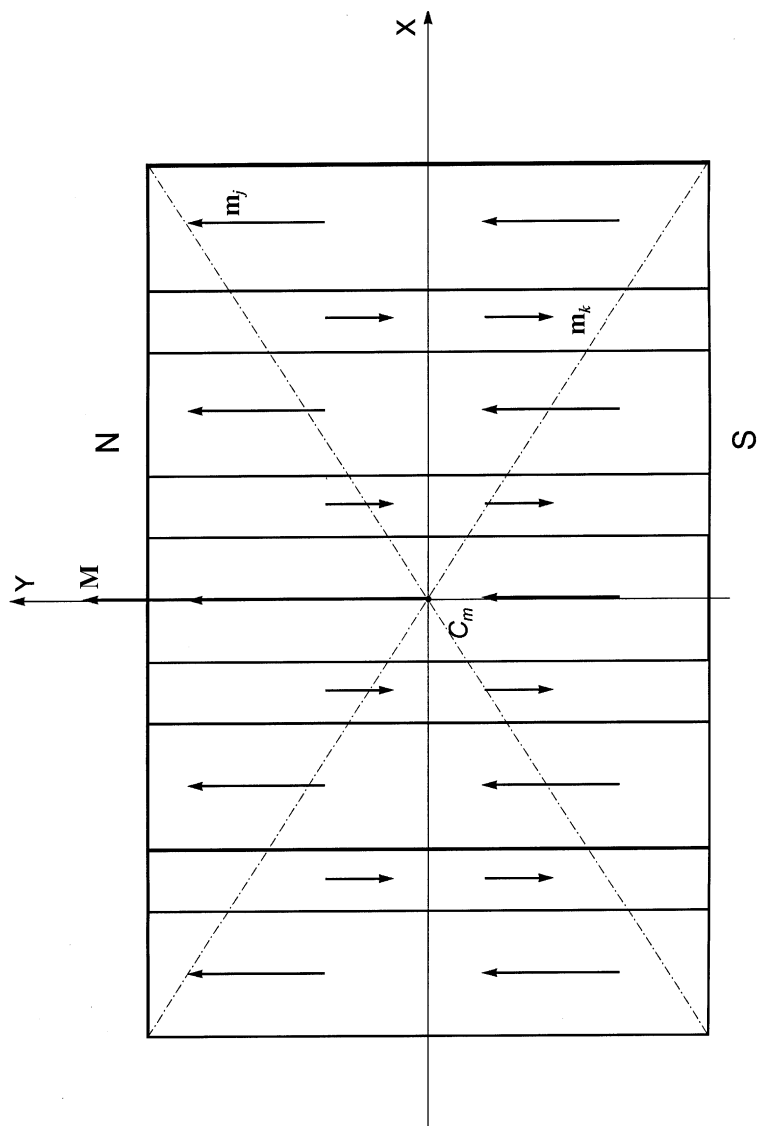


Рис. 2.

наблюдения доменов (для простоты анализа удобно использовать пленку с доменами, моменты которых параллельны или антипараллельны);

— производится фотографирование площадки с доменами при воздействии внешнего МП, величина и направлении которого каждый раз произвольно меняются.

Анализ результатов производится графически, для чего:

— определяется геометрический центр площадки на фотографии, который принимается за точку C_m ;

— проводятся координатные оси X и Y с началом координат в точке C_m так, чтобы направление оси Y совпадало с одним из направлений намагниченности доменов (рис. 2, схематично показана полосовая доменная структура кристалла или тонкой ферромагнитной пленки);

— для нашего случая на плоскости, по аналогии с методикой определения координат центра тяжести в механике (вывод соотношений для общего случая приведен в [1]), можно записать:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^P \mathbf{m}_j x_j = 0, & \quad \sum_{k=1}^q \mathbf{m}_k x_k = 0, \\ \sum_{j=1}^P \mathbf{m}_j y_j = 0, & \quad \sum_{k=1}^q \mathbf{m}_k y_k = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где \mathbf{m}_j и \mathbf{m}_k — магнитные моменты участков доменов, направленных соответственно вверх и вниз вдоль оси Y ; x_j, y_j, x_k, y_k — координаты точек приложения магнитных моментов (геометрических центров) соответствующих участков доменов.

Если учесть, что магнитные моменты доменов пропорциональны их площадям, то (1) можно переписать:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^P S_j x_j = 0, & \quad \sum_{k=1}^q S_k x_k = 0, \\ \sum_{j=1}^P S_j y_j = 0, & \quad \sum_{k=1}^q S_k y_k = 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где S_j и S_k — площади участков доменов, направленных соответственно вверх и вниз вдоль оси Y .

На рис. 2 требования (2) выполняются. В общем случае домены могут принимать любую форму, однако (2) должны выполняться с точностью до выполнения закона сохранения энергии для макроструктур, т.е. абсолютно точно, что и является подтверждением неподвижности точки C_m .

В случае отрицательного результата необходимо проверить возможность инструментальной ошибки. В противном случае кроме нарушения закона сохранения энергии можно прийти еще к двум абсурдным выводам:

— получен асимметричный магнит, у которого один полюс намагничен более, чем другой;

— МП не векторно, поскольку для него не выполняется правило сложения векторов.

Эксперимент удобно проводить на тонкой ферромагнитной пленке, поскольку толщину доменов можно считать одинаковой и достаточно малой (десятки или сотни ангстрем), что без существенной погрешности позволяет производить анализ на плоскости.

Границы доменов как магнитонейтральные в расчетах не учитываются.

В нашем случае под однородными магнитными материалами подразумеваются материалы, сплошь состоящие из доменов или содержащие мелкие, равномерно распределенные по всему объему включения, не имеющие доменной структуры.

Если имеются отдельные крупные включения, то их необходимо исключать из рассмотрения и точка C_m естественно сместится от геометрического центра тела. Координаты точки C_m во всех случаях удобно определять из предельного случая намагничивания до насыщения.

Важно подчеркнуть, что неизменность координат точки C_m как следствие закона сохранения энергии можно рассматривать только во внешнем МП. При нагреве части тела выше точки Кюри при одновременном охлаждении оставшейся части или его деформации, приводящей к изменению формы, точка C_m сместится. При этом нарушения закона сохранения энергии не происходит, поскольку в замкнутую систему вносится дополнительная энергия (в одном случае — тепловая, в другом — механическая).

Рассмотрим некоторые следствия, вытекающие из изложенного.

1. Процесс намагничивания однородной магнитной стрелки можно интерпретировать следующим образом. В размагниченном состоянии

$\mathbf{M} = 0$. При воздействии внешнего МП в результате процессов смещения и вращения доменов их магнитные моменты, складываясь, создадут \mathbf{M} , приложенный в точке C_m , расположенной в центре масс стрелки или в общем случае вблизи него. При изменении внешнего МП по величине и направлению меняется по величине и направлению \mathbf{M} , закрепленный в точке C_m , что и воспринимается внешним наблюдателем как дипольность стрелки. Взаимодействие магнитной стрелки с контуром или соленоидом с постоянным током можно рассматривать как взаимодействие двух векторов — \mathbf{M} стрелки и \mathbf{M} контура или соленоида, приложенного в их геометрических центрах.

При таком рассмотрении понятие магнитной нейтрали, применяемое в практической электротехнике, приобретает конкретный смысл. Ее можно определить как плоскость, проходящую через точку C_m перпендикулярно к \mathbf{M} .

Если разрезать магнитную стрелку на части, то магнитные домены частей перераспределяются так, чтобы точка C_m каждой из них совпала с их геометрическими центрами. Очевидно, что это произойдет с наименьшими энергетическими затратами, если направление \mathbf{M} каждой части будет совпадать или будет близким по направлению с \mathbf{M} исходной стрелки.

2. Если поместить однородное ферромагнитное тело в соленоид с постоянным током, то по аналогии с механикой возникнет втягивающая сила, которая будет стремиться совместить точку C_m тела и точку C_m соленоида. При их совмещении втягивающая сила станет равной нулю. Для магнитной стрелки это очевидно, для тела произвольной формы легко подтверждается экспериментально. В общем случае указанное позволяет объяснить принцип действия электрических машин взаимодействием двух векторов — \mathbf{M} подвижной и \mathbf{M} неподвижной магнитных систем.

3. Выполнение жесткого требования — абсолютной неподвижности точки C_m при ограниченной толщине границ доменов приводит к следующим эффектам:

— в процессе поворотов доменов возникают условия, при которых неподвижность точки C_m может обеспечиваться только деформацией тела (эффекта Баркгаузена);

— после окончания переориентации доменов неподвижность точки C_m может в некоторых случаях также обеспечиваться только деформацией тела (положительная и отрицательная магнитострикция); и

наоборот, механические напряжения, приводящие к изменению формы тела, следовательно и к смещению точки C_m , неизбежно приведут к переориентации доменов;

— для того чтобы сохранить точку C_m неподвижной, должны существовать направления, вдоль которых домены могут переориентироваться с меньшими энергетическими затратами, независимо от того, тело аморфное или кристаллическое (анизотропия).

Все вышеизложенное можно полностью отнести и к сегнетоэлектрикам при их поляризации во внешнем электрическом поле, чем и обуславливается однотипность феноменологических свойств магнитных материалов и сегнетоэлектриков.

Имитацию указанных процессов удобно производить на компьютере по программе, предусматривающей исходное состояние доменов (величину и направление \mathbf{m}_i); неизменность координат точки C_m , находящейся в геометрическом центре однородного образца, и максимально допустимую толщину границ доменов. Имитацию удобно производить изменением \mathbf{M} по величине и направлению, что соответствует изменению внешнего поля.

В заключение отметим, что способность механической модели предсказывать свойства магнитных материалов и сегнетоэлектриков вполне убедительна для того, чтобы допустить, что именно она реализуется в природе. Такой подход может подтвердить провидение И. Ньютона, который в своих "Началах", проводя параллели между известными к тому времени силами, неоднократно подчеркивал, что "магнитная сила" по аналогии с гравитационной приложена к центру намагниченного тела.

Список литературы

- [1] *Вонсовский С.В.* Магнетизм. М.: Наука, 1984.
- [2] *Овакимян А.Т.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 15. С. 90–95.