**Модификация модели Кондорского в рамках исследования процессов перемагничивания в постоянных магнитах типа Nd-Fe-B**

**Уржумцев А.Н., *Мальцева В.Е.***

младший научный сотрудник, к.ф.-м.н., *аспирант*

*Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт естественных наук и математики, Екатеринбург, Россия*E–mail: andrei.urzhumtsev@urfu.ru

Редкоземельные постоянные магниты (ПМ) на основе фазы Nd2Fe14B наиболее востребованы для электродвигателей в составе электромобилей, электросамокатов, дронов и др. Активно продвигаются аддитивные технологии создания данного класса ПМ. Получаемые магниты имеют сложную гетерогенную микроструктуру, которая оказывает существенное влияние на фундаментальные параметры, как обменный параметр *A*, константа магнитокристаллической анизотропии *K* и др., поэтому вопрос о механизме перемагничивания остается дискуссионным. Дальнейшее развитие данного направления требует детального представления о природе формирования высококоэрцитивного состояния.

Для исследования выбраны наиболее распространенные марки N35, N48 и N48SH постоянных магнитов типа Nd-Fe-B, предоставленные предприятием ООО «ПОЗ – Прогресс». Исследование микроструктуры проведено с помощью СЭМ и EDX анализа на микроскопе Tescan Mira3 LMU. Зависимости коэрцитивной силы *H*c(θ) от угла отклонения θ размагничивающего поля *H* к оси текстуры магнитов получены на вибрационном магнитометре КВАНС-1.

Одним из возможных подходов к исследованию механизмов перемагничивания в магнитотвердых материалах является анализ угловых зависимостей коэрцитивной силы *H*c(θ) в рамках моделей Кондорского для механизма задержки смещения доменных границ и Стонера-Вольфарта для задержки зародышеобразования и когерентного вращения векторов намагниченности. Для реальных магнитов *H*c(θ) зачастую не описываются в рамках приближения данных моделей ввиду того, что спеченные ПМ формируют сложную гетерогенную нано- и микроструктуру, что требует дополнительного учета магнитостатического и межзеренного обменного взаимодействия.

В случае преобладания механизма задержки смещения доменной границы, в рамках модели Кондорского, коэрцитивная сила определяется проекцией размагничивающего поля *H* на ось текстуры магнита, при этом угловая зависимость коэрцитивной силы *H*c(θ) описывается формулой:

$H\_{c}(θ)=\frac{H\_{c}(0)}{\cos(θ)},$ (1)

где $H\_{c}(0)$ – величина коэрцитивной силы вдоль оси текстуры.

Формирования локальных дефектов микроструктуры приводит к распределению зерен ПМ по величине коэрцитивной силе, что приводит к перемагничиванию части зерен в сравнительно слабых магнитных полях. В модели Кондорского учитывается, что на уже перемагниченный объем образца действует только проекция внешнего размагничивающего поля *H* под углом θ к оси текстуры. При этом в данной модели не учитывается, что перемагниченный объем или заряженная доменная стенка создает собственное локальное магнитное поле *H*loc ≈ 4π*M*s, направленное вдоль оси текстуры. Учитывая этот факт, доменная стенка и домен вблизи нее оказываются под действием не только внешнего размагничивающего поля *H*ext, а суперпозиции полей, которую можно обозначить, как эффективное поле *H*eff.

Эффективное размагничивающее поле *H*eff обозначим, как векторную сумму,

$\vec{H\_{eff}}=\vec{H\_{ext}}+\vec{H\_{loc}}$, (2)

тогда модуль напряженности магнитного поля может быть записан как:

$H\_{eff}=(H\_{loc}^{2}+H\_{ext}^{2}-2H\_{loc}H\_{ext}\cos((π-θ)))^{\frac{1}{2}}$, (3)

Угол между направлением эффективного магнитного поля и ближайшим направлением оси текстуры выражается как:

$θ^{\*}=arcsin(H\_{ext}\sin(\left(π-θ\right))/H\_{eff})$, (4)

Рассмотрим новую угловую зависимость коэрцитивной силы в приближении:

$H\_{loc}=4πM\_{s}$, (5)

$H\_{ext}=H\_{c}$, (6)

Введем параметр *k*, соответствующий отношению коэрцитивной силы *H*c к внутреннему полю в зерне *H*loc

$k=\frac{H\_{c}}{4πM\_{s}}$, (7)

Выражение для эффективного угла θ\* для внешнего размагничивающего поля относительно оси текстуры магнита примет следующий вид:

$θ^{\*}=arcsin⁡(\frac{k\sin(\left(θ\right))}{\sqrt{k^{2}+2k\cos((θ))+1}})$, (8)

Далее перестраиваем угловую зависимость коэрцитивной силы *H*c от нового угла θ\*, как новую *H*c\* в координатах приложения внешнего поля θ:

$H\_{c}\left(θ^{\*}\right)\rightarrow H\_{c}^{\*}(θ)$, (9)

Предложенную модификацию модели Кондорского, представленную на рисунке 1, можно трактовать, как «растяжение» зависимости *H*c(θ) вдоль угла приложения поля под влиянием магнитостатического взаимодействия соседних зерен. Для реальных магнитов типа Nd-Fe-B параметр *k* находится в пределах 2 – 2,5. Полученное распределение *H*c(θ) от *k* хорошо описывает угловые зависимости коэрцитивной силы для ПМ с преобладанием механизма задержки смещения доменных стенок на примере марок N35 и N48.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| ***Рис. 1.*** Угловые зависимости коэрцитивной силы *H*c(θ)/*H*c(0) в рамках расширенной модели Кондорского |

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-10104.