

УДК 620.179.14
ХАРАКТЕР ЗАВИСИМОСТИ ОБРАТИМОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ
НАМАГНИЧЕННОСТИ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ДЛЯ МОДЕЛИ ГИБКИХ ДОМЕННЫХ ГРАНИЦ

А.В. ЧЕРНЫШЕВ
ГНУ «ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН Беларуси»
Минск, Беларусь

В современных моделях формирования гистерезисных циклов ферромагнетиков общепринятым является разделение процессов намагничивания на обратимые и необратимые. Как предложил Кондорский Е.И., "...можно формально рассматривать ферромагнетик как результат наложения двух сред: 1) обладающей гистерезисом среды с равной нулю обратимой восприимчивостью и 2) безгистерезисной среды с восприимчивостью χ_r " [1], где χ_r – обратимая магнитная восприимчивость. Намагниченность ферромагнетика M в этом случае определяется как сумма двух составляющих – обратимой M_{rev} и необратимой M_{irr} , то есть $M=M_{rev} + M_{irr}$. Такое представление намагниченности в настоящее время является общепринятым (например, в таком виде обычно представляется формула Рэлея для частного цикла (см., например, [2]), такое представление используется в модели ферромагнетиков [3], которая уже считается классической). Часто при рассмотрении обратимого намагничивания используется модель гибких 180-градусных доменных границ (ДГ), в которой локальные участки границы, в процессе смещения, закрепляются на определенных препятствиях (дислокациях, границах зерен и др.), а остальная часть может изгибаться подобно гибкой мембране.

Рассмотрим какой характер зависимости M_{rev} от напряженности внешнего магнитного поля H получается в этом случае. Величина изменения M_{rev} для такой модели пропорциональна величине изменения объема ферромагнетика под ДГ в процессе изменения радиуса ее кривизны. В модели Джайльса-Эйсертонна (Jiles-Atherton) [3] полагается, что приращение объема под искривленной ДГ имеет форму шарового сегмента. Это значит, что участки ДГ закрепляются на препятствиях, имеющих вид кольца. Однако в указанной работе [3] при выводе выражения, определяющего зависимость M_{rev} от давления P , действующего на ДГ, делается ряд упрощающих расчет допущений. В указанной работе полагается, что $P=C(M_{an}-M_{irr})$, где C – константа для рассматриваемого ферромагнетика, M_{an} – намагниченность на безгистерезисной кривой при рассматриваемом значении H , а M_{irr} – достигнутая при этом величина необратимой составляющей намагниченности. Например, в полученном уже с приближением, а именно, в предположении о малом отличии формы доменной границы от плоской выражении для зависимости M_{rev} от P , имеющем вид $M_{rev}=fP+gP^3$, где f и g кон-

станты для рассматриваемого материала затем просто отбрасывается последнее слагаемое в правой части, и в окончательном виде выражение для M_{rev} записывается как: $M_{rev}=fP=c(M_{an}-M_{irr})$, где c – также константа. Если P представить в другом виде, а именно, $P=2\mu_0M_s(H-H_0)$, где H_0 – напряженность внешнего магнитного поля, при которой гибкая ДГ граница достигает плоской формы своей поверхности [4], то результатом указанных выше упрощающих допущений является то, что зависимость M_{rev} от H имеет линейный характер, то есть $M_{rev}=k(H-H_0)$, где k – константа для рассматриваемого ферромагнетика. Рассмотрим какой характер будет иметь зависимость M_{rev} от $(H-H_0)$ при строгом, с математической точки зрения, расчете. Аналитические выражения для такого случая приведены в [5]. Численные вычисления по приведенным в [5] формулам показывают, что зависимость M_{rev} от $(H-H_0)$ в общем случае нелинейная, а именно – при малых отклонениях формы ДГ от плоской эта зависимость действительно близка к линейной, но по мере приближения радиуса кривизны доменной границы к радиусу удерживающего ее кольцевого препятствия зависимость все более отличается от линейной. При этом по мере уменьшения радиуса кривизна ДГ величина χ_r (равная в данном случае $\partial M_{rev}/\partial H$) возрастает. Как известно, при достижении равенства радиуса кривизны ДГ и радиуса кольцевого препятствия, на котором ДГ удерживается, происходит ее отрыв от препятствия.

Известны также расчеты зависимости M_{rev} от $(H-H_0)$ для случая, когда гибкая 180-градусная ДГ удерживается на препятствиях, имеющих вид двух прямых параллельных линий. В этом случае в процессе “раздувания” ДГ приращение объема под ней имеет вид цилиндрического сегмента. Пример такого расчета приведен, например, в [6]. При этом, как и в рассмотренном выше случае, применяются упрощающие расчет допущения, в результате чего также получают линейную зависимость M_{rev} от H (выражение (18.52) в [6]). Точный же, с математической точки зрения, расчет, как и в рассмотренном ранее случае, показывает, что зависимость M_{rev} от $(H-H_0)$ имеет, в общем случае, нелинейный характер. Пример результата численного расчета приведен на рисунке. При этом следует отметить, что характер зависимости не изменяется при варьировании в широких пределах численных значений расстояния между линиями закрепления и величины поверхностной энергии ДГ. Из рис. 1 видно, что, как и в предыдущем случае, по мере приближения радиуса кривизны доменной к половине расстояния между линиями закрепления величина χ_r возрастает. Максимум χ_r достигается непосредственно перед отрывом ДГ от удерживающих ее препятствий. Из приведенных данных видно, что линейная зависимость M_{rev} от H наиболее близко соответствует реальности, когда на размагниченный образец (при этом ДГ имеют плоскую форму) воздействует знакопеременное магнитное поле с таким амплитудным значением, что при мак-

симальном искривлении форма ДГ мало отличается от плоской. Если же под действием возрастающего по напряженности внешнего магнитного поля радиус кривизны ДГ становится сравним с половиной расстояния между линиями их закрепления, то сразу после перемены направления изменения H величина χ_r , по мере уменьшения H , должна уменьшаться. Это соответствует результатам экспериментальных измерений зависимости χ_r от H , приведенных в [7].

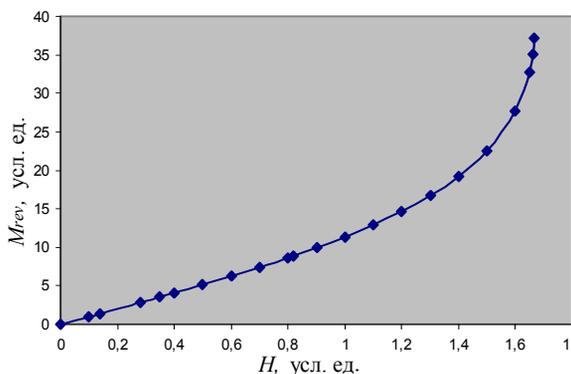


Рис. 1. Зависимость M_{rev} от H

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кондорский, Е. И.** Теория гистерезиса поликристаллических ферромагнетиков в слабых магнитных полях / Е. И. Кондорский // ДАН СССР. – 1941. – Т. 30, № 7. – С. 598–602.
2. **Kronmuller, H.** Statistical Theory of Rayleigh's Law / H. Kronmuller // Z. angew. Physik. – 1970. – Bd. 30. – S. 9-13.
3. **Jiles, D. C.** Theory of Ferromagnetic Hysteresis / D.C. Jiles, D.L. Atherton // JMMM. – 1986. – Vol. 61. – P. 48–60.
4. **Jiles, D. C.** Dynamics of Domain Magnetization and the Barkhausen Effect / D.C.Jiles // Czechoslovak J. Phys. – 2000. – V. 50. – P. 893–988.
5. **Escobar, M.A.** Analytical prediction of the magnetization curve and the ferromagnetic hysteresis loop / M.A. Escobar, R. Valenzuela, L.F. Magana // J. Appl. Phys. – 1983. – Vol.54, № 10. – P. 5935–5940.
6. **Тикадзуми, С.** Физика ферромагнетизма. Магнитные характеристики и практическое применение / С. Тикадзуми. – М. : Мир, 1987. – 419 с.
7. **Чернышев, А. В.** О характере зависимости обратимой магнитной проницаемости стальных образцов от напряженности смещающего поля / А. В. Чернышев // ФММ. – 2001. – Т. 92. – С. 49–54.

E-mail: lab5@iaph.bas-net.by