

Действительный член АН БССР Н. С. АКУЛОВ и Т. А. ЕЛКИНА

О НЕКОТОРЫХ НОВЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ, СВЯЗЫВАЮЩИХ ВЕЛИЧИНУ ПОТЕРЬ С КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛОЙ

Релей ⁽¹⁾ установил эмпирические законы для намагничения и гистерезиса в слабых магнитных полях. Эти законы можно теоретически обосновать на основе современных представлений о природе процессов намагничения ⁽²⁻⁵⁾.

В работах Е. И. Кондорского ⁽²⁾ показано на основании теоретических соображений, что в полях слабых и средних существует связь между кривой намагничения и петлей гистерезиса данного материала, и дан графический метод, с помощью которого по заданной кривой намагничения может быть рассчитана петля гистерезиса. Таким образом, знание хода кривой намагничения для расчета петли в данном случае необходимо.

В работе Н. С. Акулова, О. С. Галкиной и В. И. Ивановского ⁽⁶⁾ введено предположение, что релейские законы для намагничения являются только первыми членами разложения в ряд, и показано, что учет следующих членов приводит к формуле для потерь следующего вида:

$$W = \frac{8}{3} I_R H_m$$

где I_R и H_m представляют собой остаточное намагничение и коэрцитивное поле данного частного цикла. Опытная проверка показала применимость данной формулы в полях, значительно превосходящих релейские. Справедливость ее в релейской области очевидна.

В настоящей работе показано, что для области инверсии можно установить новую еще более общую закономерность, которая связывает потери с другими магнитными характеристиками.

Как показали результаты предшествующих работ ⁽³⁾, для расчета необратимой части намагничения и потерь в слабых полях можно представить ферромагнетик в виде комплекса элементарных областей с прямоугольными петлями гистерезиса. При этом предполагается, что интенсивность намагничения для всех областей одна и та же, а коэрцитивные силы могут меняться. Взаимодействие областей учитывается введением подмагничивающего поля, которое может иметь различную величину и знак. Чтобы учесть обратимые смещения границ между доменами, дополним эту модель предположением, что форма элементарной петли является не прямоугольником, а параллелепипедом, причем угол наклона α является характеристикой обратимой восприимчивости, а именно, $\chi_r = \operatorname{tg} \alpha$ (χ_r — обратимая восприимчивость).

Намагничение в данном поле H , равное I , складывается из обратимой части $I_{обр} = \chi_r H$ и необратимой I_n , т. е. $I = \chi_r H + I_n$.

Таким образом, каждая область в такой модели характеризуется значениями: a (коэрцитивная сила), h (подмагничивающее поле) и χ_r (обратимая восприимчивость). В целях упрощения далее предполагается, что χ_r для всех областей одно и то же и совпадает с χ_r материала, определенным экспериментально, а коэрцитивные силы и подмагничивающие поля могут иметь различные значения.

Для того чтобы рассчитать необратимое намагничение в данном поле H , нужно знать закон распределения элементарных областей по подмагничивающим полям и коэрцитивным силам.

Известно из предшествующих работ, что для релеевской области полей необходимо предположить постоянство функции распределения, чтобы получить согласие с опытом. В полях более сильных, но не выходящих за область инверсии, постоянство функции распределения естественно не сохраняется.

Покажем, что даже в том случае, если не делать никаких предположений о том, как именно меняется эта функция, все же можно установить закономерность, связывающую потери с необратимым намагничением и коэрцитивной силой данного частного цикла. Для упрощения выводов удобно применить графический метод, использованный Прейзахом для расчета необратимой части намагничения и потерь. Введем прямоугольную систему координат, по осям которой отложены коэрцитивные силы (a) и подмагничивающие поля (h). Каждая область изобразится в таком случае точкой с определенными значениями a и h .

Можно показать, что в данном поле величины H окажутся намагниченными в направлении поля все области, которые заключены внутри прямоугольного треугольника ABC , который образован пересечением оси ординат и двух прямых, уравнения которых $H = h + a$

и $H = h - a$. Число этих областей равно $\int_0^H \int_{a-H}^{H-a} f(a, h) da dh$ ($f(a, h)$ — функция распределения).

Необратимое намагничение в данном поле отличается от написанного интеграла постоянным множителем, физический смысл которого — величина магнитного момента области.

Таким образом, необратимое намагничение I_n в данном поле H выражается следующим образом:

$$I_n = c \int_0^H \int_{a-H}^{H-a} f(a, h) da dh$$

(c равно магнитному моменту области). Потери возникают вследствие перемагничивания всех этих областей.

Площадь петли каждой области равна $w = 2c2a = 4ac$. Чтобы получить общие потери, необходимо просуммировать все петли. Отсюда

$$W = 4c \int_0^H \int_{a-H}^{H-a} af(a, h) da dh$$

(W — потери на 1 см^3 материала).

Допустим, что коэрцитивная сила данного частного цикла, наблюдаемая в опыте, является средним из значений коэрцитивных сил отдельных областей, т. е. может быть определена следующим образом:

$$H_c = \frac{\int_0^H \int_{a-H}^{H-a} af(a, h) da dh}{\int_0^H \int_{a-H}^{H-a} f(a, h) da dh}$$

Интеграл, стоящий в числителе, суммирует коэрцитивные силы всех областей, а знаменатель представляет собой общее число областей. Можно показать, что такое выражение для коэрцитивной силы получается, если считать перемагничиваемые области взаимно связанными и решить методами магнитостатики задачу о коэрцитивной силе системы намагниченных тел, соединенных последовательно. Однако, поскольку указанное выражение никак не учитывает наличия обратимого намагничивания в материале, то можно предполагать, что его законность ограничивается случаями, когда обратимая часть намагничивания мала в сравнении с необратимой.

Сравнивая полученные выражения для I_m , W и H_c , получаем, что

$$W = 4I_m H_c.$$

Экспериментальная проверка полученной формулы была проведена на материалах: кобальт, сталь-5, альсифер, 45% пермаллой и 78% пермаллой (данные для всех материалов, кроме кобальта, взяты из литературы*).

Результаты сравнения с опытом приведены в табл. 1.

Таблица 1

Материал	Магнитное поле H_m в эрст.	Макс. намагничивание I_m в гаусс.	Начальная восприимчивость χ_0	Обратимая восприимчивость χ_r	Необратимое намагничивание $I_n = I_m - \chi_r H_m$	Коэрцитивная сила H_c	Потери из опыта в эрг/см ³	Теорет. значение потерь $W = 4I_m H_c$
Кобальт	65	286	1,6	1,32	200	12,5	10500	10000
Пермаллой 78%	0,092	188	760	610	132	0,053	26	28
Пермаллой 45%	0,3	213	230	214	149	0,16	96	94
Альсифер	0,21	188	263	237	133	0,147	76,5	78
Сталь-5	8	500	13	11	412	4	6640	6600

Из сравнения данных, помещенных в табл. 1, видно, что расхождение теоретических и экспериментальных значений потерь во всех рассмотренных случаях не превосходит 5%, т. е. находится в пределах тех ошибок, которые могут иметь место в опыте или при графическом подсчете потерь.

Поступило
22 I 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Rayleigh, Phil. Mag., 23, 225 (1887). ² Е. И. Кондорский, ДАН, 30, № 7 (1941). ³ F. Preisach, Zs. f. Phys., 94, 277 (1935). ⁴ Т. А. Елкина, ЖЭТФ, 20, 1 (1950). ⁵ Н. С. Акулов и Т. А. Елкина, ДАН, 59, № 6 (1948). ⁶ Н. С. Акулов, О. С. Галкина и В. И. Ивановский, ДАН, 68, № 5 (1949). ⁷ С. В. Вонсовский и Я. С. Шур, Ферромагнетизм, 1948.

* Для всех материалов, кроме кобальта, экспериментальные данные имелись только для кривой намагничивания, начальной восприимчивости и спинки петли гистерезиса. Чтобы получить всю петлю, пришлось применить экстраполяцию χ_r , рассчитывалось по кривой Ганса (?), а для кобальта — по экспериментальной кривой из работы Самуэль (?).