

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

К ТЕОРИИ ПОТЕРЬ НА ГИСТЕРЕЗИС ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПОЛЯХ

Основные закономерности, которым подчиняются магнитная проницаемость и потери на гистерезис в области слабых магнитных полей переменной интенсивности, были, как известно, экспериментально установлены Релеем⁽¹⁾. Теоретически эти закономерности впервые получены Прейзахом⁽²⁾. В дальнейшем ряд работ для области слабых и средних полей провел Е. И. Кондорский⁽³⁾.

Между тем для явлений потерь на гистерезис в полях постоянной интенсивности, вращающихся относительно образца, никаких количественных закономерностей ни экспериментально, ни теоретически до сих пор установлено не было.

Исходя из развитых ранее представлений о механизме процессов намагничивания⁽⁴⁾, нами было установлено, что в случае одноосных ферромагнитных металлов (типа кобальта) потери на вращение в области релеевских полей должны также нарастать пропорционально кубу поля, но превышать потери в поле переменной величины в 2,36 раза.

Для проверки развитой теории данные из работ других исследователей невозможно было использовать, так как измерений на кобальте в релеевских полях не было проведено.

В экспериментальном отношении эта задача встречает трудности главным образом вследствие того, что существующие методы измерения потерь во вращающихся полях⁽⁵⁻⁹⁾ по существу неприменимы для области слабых полей вследствие недостаточной точности и чувствительности этих методов.

В данной работе описан новый тип магнитометра и новый метод измерения потерь во вращающихся полях. Применение их дало возможность провести соответствующее исследование и установить ряд соотношений количественного характера для потерь во вращающихся полях, а также найти соотношения, устанавливающие связь между потерями двух видов.

Потери во вращающихся полях возникают в том случае, если вектор намагничивания образца при вращении поля отстает от вектора поля. Величина вращающего момента, действующего на образец:

$$M = [H \cdot J]. \quad (1)$$

Здесь M — вектор вращающего момента, H — вектор поля, J — вектор намагничивания.

Покажем прежде всего, что в данном случае безразлично, что понимать под H — внутреннее (истинное) или внешнее, т. е. приложенное магнитное поле, так как они связаны зависимостью

$$H = H_0 - NJ, \quad (2)$$

где H — истинное магнитное поле, H_0 — приложенное магнитное поле, N — размагничивающий фактор.

Действительно, согласно (1) и (2) имеем:

$$M = [H_0 \cdot J] = H_0 J_n,$$

где J_n — нормальная составляющая намагничивания.

Работа, которую нужно затратить при непрерывном вращении диска в поле на каждый полный оборот, будет равна $\oint M d\alpha$.

Эта работа затрачивается необратимо, вызывая нагревание образца, т. е. представляет потери на гистерезис вращения. Следовательно, потери на вращение определяются соотношением:

$$W_{\text{вращ}} = \oint M d\alpha = H_0 \oint J_n d\alpha. \quad (3)$$

Таким образом, задача об измерении потерь на вращение сводится к измерению кривых нормальной составляющей намагничивания в функции поля H_0 и угла поворота α .

Все существовавшие до настоящего времени магнитометры позволяли измерять только составляющую намагничивания, параллельную действующему магнитному полю. Магнитометр, разработанный авторами настоящего исследования, позволяет измерять составляющую намагничивания, перпендикулярную полю, с такой же точностью, с какой в магнитометрах обычной конструкции измеряется параллельная составляющая намагничивания.

Схема расположения катушек, стрелки и измеряемого образца в указанном магнитометре показана на рис. 1. Прибор состоит из двух одинаковых, горизонтально расположенных катушек K и K' и астатической системы двух маленьких магнитов (A), расположенных в плоскости, перпендикулярной чертежу. Эта система подвешивается на тонкой вольфрамовой нити. Испытуемый диск D (в левой катушке) лежит в той же плоскости. Первоначально диск намагничивается вдоль оси катушки и тогда, как легко видеть, астатическая система остается неподвижной. Однако при повороте диска*, когда вектор намагничивания частично увлекается диском и создается вертикальная составляющая намагничивания, на астатическую систему начинает действовать вращающий момент, совершенно так же, как это имеет место в магнитометрах Бозорта и Акулова⁽¹⁰⁾.

Из рис. 1 нетрудно убедиться, что магнитометр (при симметричном положении образца относительно магнитов) будет реагировать только на вертикальную составляющую намагничивания, перпендикулярную намагничивающему полю.

Потери на вращение определялись следующим образом: измерялись кривые нормальной составляющей намагничивания в функции угла поворота при вращении образца по часовой стрелке и против нее (измерялся всякий раз второй цикл, так как первый не являлся стационарным). Площадь между полученными кривыми есть $2 \oint J_n d\alpha$.

Потери вычислялись по формуле (3). Так как по форме кривые очень напоминали синусоиды (малой амплитуды), то был применен

* Плавный поворот осуществляется с помощью бесконечного винта и соответствующей шестерни.

еще другой способ вычисления потерь на вращение, который состоял в том, что средняя ширина петли в местах максимума и минимума умножалась на π .

Представляло интерес найти связь между кривой намагничивания материала, потерями в поле переменной величины и потерями на вращение. Для этой цели были измерены кривая намагничивания и потери в поле меняющейся величины на магнитометре обычного типа с вертикальными катушками*.

Объектом исследования служил поликристаллический кобальт. Основанием для такого выбора послужило то обстоятельство, что кристаллы кобальта имеют лишь одно направление легкого намагничивания, и ввиду этого искомые закономерности должны быть особенно просты.

Из одной и той же отливки кобальта были сделаны 2 образца: диск (диаметр 15 мм и толщина 0,5 мм) и стержень (длина 15 мм и сечение 0,25 мм²).

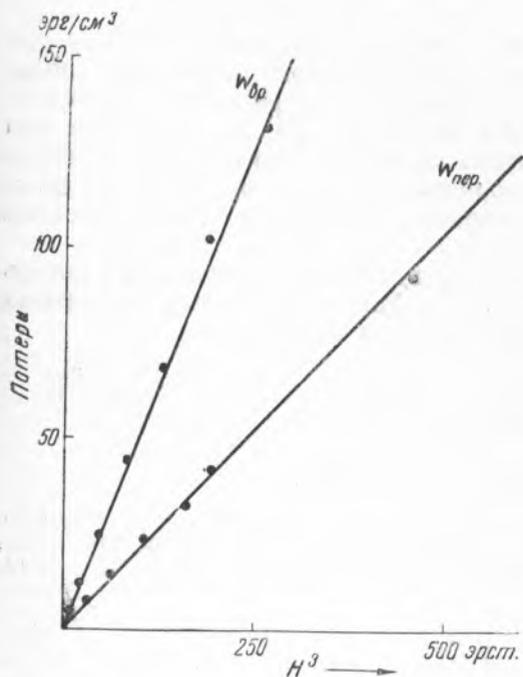


Рис. 3. Потери на перемагничивание и на вращение у кобальта в зависимости от куба магнитного поля

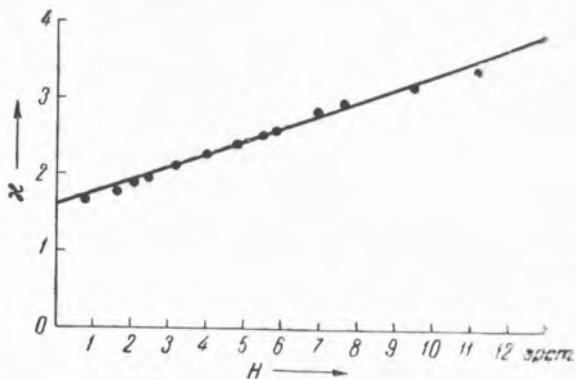


Рис. 2. Восприимчивость кобальта в функции магнитного поля

На диске были измерены потери на вращение, а на стержне — кривая намагничивания и потери в поле переменной величины. Обойтись одним только диском для всех измерений было неудобно, потому что тогда для вычисления абсолютной величины намагничивания нужно было бы заменять диск эквивалентной катушкой, дающей то же распределение поля в пространстве, которое дает намагниченный диск. Так как расстояние от образца до стрелки магнитометра было взято малым (из соображений повышения чувствительности), то подобрать такой эквивалент было трудно. Обойти это затруднение оказалось возможным путем использования при измерениях двух образцов.

Стержень и диск были

* В настоящее время нами сконструирован магнитометр с вращающимися катушками, который позволяет проводить измерения двух видов потерь на одной и той же установке.

сделаны из одной и той же отливки кобальта размером 15 см³. Вначале были вырезаны 2 диска одинаковых геометрических размеров, и измерениями на магнитометре было установлено, что их магнитные свойства с точностью порядка 20% одинаковы. Затем из одного диска был вырезан стержень. Таким образом, влияние неоднородности материала на результатах измерений сказаться не могло.

Измерения магнитных характеристик производились в слабых магнитных полях от 1 до 10 Ое. Рис. 2 и 3 ($W_{\text{пер}}$) показывают результаты измерения восприимчивости кобальта (рассчитанной по кривой намагничения) и потерь на гистерезис в поле меняющейся величины. Из рис. 2 и 3 видно, что в пределах указанных полей намагничение кобальта (так же как и у материалов с кубической решеткой, исследованных ранее другими авторами) следует релейским законам, т. е.:

1) восприимчивость линейно зависит от поля и может быть рассчитана по формуле:

$$\chi = \chi_0 + b_0 H$$

(значения констант χ_0 и b_0 оказались: $\chi_0 = 1,6$, $b_0 = 0,165$).

2) Потери в поле переменной интенсивности следуют закону $W_{\text{пер}} = bH^3$. При этом, в согласии с формулами Релея, в пределах ошибок опыта $b = \frac{4}{3} b_0$.

Потери на вращение определялись для полей от 2 до 7 Ое. Результаты этих измерений также показаны на рис. 3 (кривая $W_{\text{вр}}$).

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет в полном соответствии с теорией сделать следующие выводы:

- 1) Потери на вращение в области слабых магнитных полей у кобальта нарастают пропорционально кубу истинного магнитного поля, т. е. по тому же закону, как и потери в поле переменной величины.
- 2) В области слабых магнитных полей потери на вращение при амплитуде H превышают потери в поле меняющейся величины весьма близок к 2,4 ($\pm 0,2$), что хорошо согласуется с теоретическим значением 2,36.

Итак, мы видим, что результаты проведенного исследования потерь на гистерезис поликристаллического кобальта в слабых магнитных полях количественно подтверждают выводы теории.

Магнитная лаборатория
Института физики Московского государственного
университета им. М. В. Ломоносова

Поступило
16 XII 1947

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Lord Rayleigh, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **23**, 225 (1887). ² F. Preisach, Z. f. Phys., **94**, 277 (1935). ³ Е. И. Кондорский, ДАН, **30**, № 7 (1941); **32**, № 5 (1941). ⁴ Н. С. Акулов, Ферромагнетизм, 1939. ⁵ M. Beattie, The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, **1**, 642 (1904). ⁶ P. Weiss et V. Planer, J. de Phys. et le Radium, **7**, 5 (1908). ⁷ R. Gans u. R. Loyarte, Arch. f. Elektrotechnik, **3**, 6, 139 (1915). ⁸ J. v. Harlem, Ann. d. Phys., **14**, 667 (1932). ⁹ Н. Л. Брюхатов и А. А. Баскаков, ЖЭТФ, **9**, 8, 984 (1939). ¹⁰ N. S. Akulov, N. V. Bichkov u. A. A. Helfenbein, Z. Physik, **78**, 808 (1932).