

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

(017):538

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ СИ В МАГНЕТИЗМЕ*)*Л. Бейтс*

Заметка посвящена применению системы единиц СИ для описания магнитных свойств вещества, в особенности материалов для постоянных магнитов. Показано, что не возникает существенных трудностей при выражении классических и современных представлений о магнетизме с помощью единиц системы СИ.

1. ВВЕДЕНИЕ

В статье «Электрические и магнитные единицы системы СИ» Д. Смит¹ провел очень полезное обсуждение единиц СИ и влияния их применения на преподавание соответствующих глав курса физики в средних и высших учебных заведениях. Важно рассмотреть также результаты использования этих единиц в некоторых областях прикладной физики. На симпозиуме группы магнетизма Физического института и Физического общества 16 декабря 1969 г., посвященном обсуждению вопроса о преподавании магнетизма, Э. Снеллинг из Исследовательских лабораторий Муллард прочитал интересный доклад на тему «Единицы системы СИ в технологии магнитов», с которым я познакомился с большим интересом.

В настоящей заметке я хотел бы высказать соображения об использовании системы СИ в физике магнетизма с несколько иных позиций, руководствуясь опытом лектора и исследователя, в течение многих лет изучающего ферромагнитные материалы, имеющие столь важные применения. До сих пор значительное большинство исследователей пользовалось почти исключительно нерационализированной системой единиц СГС, особенно при описании магнитных свойств атомов, ионов и ядер, и надо признать, что в этих разделах физики применять единицы системы СГС весьма удобно. Однако в связи с ожидаемым широким распространением системы СИ в промышленности целесообразно изучить, как наилучшим образом можно ввести в эту систему старые классические представления о магнетизме.

2. ТРАДИЦИОННОЕ ОПИСАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВА

Всем нам знакомо описание процесса намагничивания с помощью полости в магнетике, позволяющее без особого труда усвоить представления о напряженности магнитного поля H , его индукции B и векторах магнитных моментов I или M (на единицу объема) либо σ (на единицу массы вещества). Предположим, что длинный стержень из ферромагнитного материала (рис. 1), магнитные характеристики которого требуется

*) L. F. Bates, The Introduction of SI in Magnetism, Contemp. Phys. **11** (3), 301 (1970). Перевод В. И. Рыдника, под редакцией и с примечаниями К. Н. Баранского.

определить, целиком введен в длинный соленоид, по которому идет постоянный ток, и примем, что на стержень действует намагничивающее поле, напряженность которого известна из величины тока и параметров соленоида и выражена в единицах СГС, т. е. эрстедах. Даже сегодня мы можем не смущаясь представлять себе поверхностно намагниченные листки или воображаемые магнитные полюсы на концах стержня и считать, что они вызывают размагничивание стержня, если стержень недостаточно длинный. Эффекты размагничивания меняются по длине стержня конечной длины; сегодня совершенно забыта работа Дусслера², который показал, как пужно измерять действительное размагничивающее

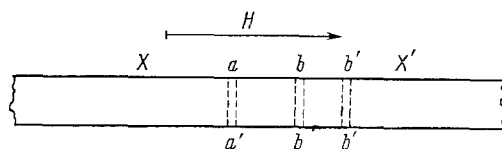


Рис. 1. Намагничивание стержневого образца.

поле, скажем, в области XX' стержня конечной длины (см. рис. 1), помещенного в поле напряженностью H_s , создаваемое длинным соленоидом.

Поле H , существующее в области XX' , обычно записывается в виде

$$H = H_s - DI \quad \text{или} \quad H = H_s - NI,$$

где I (или M) — магнитный момент единицы объема материала стержня, а D (или N) называется фактором размагничивания в области XX' .

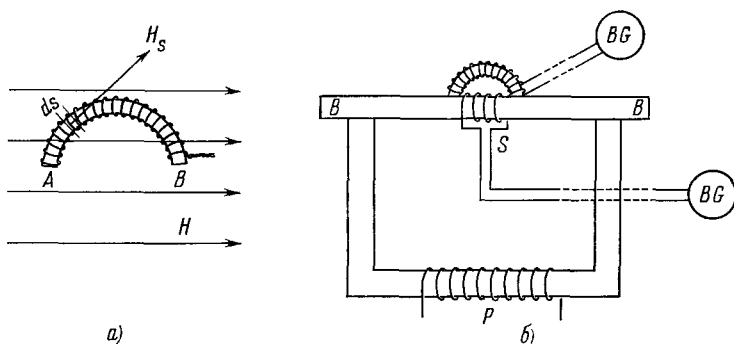


Рис. 2. Магнитный потенциометр.

Поскольку во многих случаях можно непосредственно определить напряженность поля H магнитным потенциометром *) и соответствующую индукцию B с помощью измерительной катушки, можно считать, что мы получаем соответствующие данные о значениях величин H и B в области XX'

) Магнитным потенциометром автор называет разновидность пояса Роговского. В отличие от последнего обмотка магнитного потенциометра заполняет боковую поверхность твердого диэлектрического полукольца небольших размеров (3—5 см) и подключается к баллистическому гальванометру BG (рис. 2). Торцы полукольца расположены в одной плоскости, тщательно отшлифованы и могут прижиматься к шлифованным поверхностям исследуемых материалов. Быстрое удаление потенциометра из поля вызывает отклонение гальванометра, пропорциональное средней величине напряженности магнитного поля в исследуемой области магнетика. (Предварительно потенциометр градуируется в известном поле соленоида с током.) Кроме книги автора³, применения магнитного потенциометра описаны в работах^{9},^{10*}. (Прим. ред.)

стержня при этих условиях эксперимента. Поэтому для наших целей нет нужды усложнять описание процесса намагничивания, вводя размагничивающее поле.

Величину H , как уже сказано, можно найти с помощью магнитного потенциометра; к сожалению, однако, во многих учебных лабораториях этот прибор неизвестен. Применение магнитного потенциометра осложняется тем, что для его использования требуется изготовление стержней с хорошими плоскими поверхностями, поскольку принимается, что тангенциальные компоненты поля должны быть одинаковыми по обе стороны поверхности. Используя рассматриваемое ниже в системе СИ понятие плотности внешнего магнитного потока B_0 , легко понять, что с помощью потенциометра можно измерить и эту величину $B_0 = \mu_0 H$, где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума (см. ниже).

Теперь мы должны вкратце остановиться на понятии магнитной индукции B . В течение многих лет ограничивались ее рассмотрением как поля, которое должно существовать в узкой полости в образце (например, aa' на рис. 1) и которое в принципе можно измерить по силе, испытываемой проводником с током, помещенным в эту щель, или же по отклонению пучка электронов, движущихся в щели параллельно направлению aa' . Тогда можно записать

$$B = H + 4\pi I \quad (\text{или } B = H + 4\pi M),$$

используя единицы системы СГС; при этом величины B , H и I (или M) имеют одинаковую размерность. Удобно также писать

$$B = \mu H = H + 4\pi I$$

или

$$\mu - 1 = \frac{4\pi I}{H} = 4\pi k,$$

где μ называлось магнитной проницаемостью области XX' стержня, а k — его объемной магнитной восприимчивостью, причем μ и k были безразмерными величинами.

Далее, следует сделать ряд замечаний в отношении величины I . Этот вектор, как видно из предыдущего, рассматривали как величину, пропорциональную напряженности магнитного поля, возникающего в результате появления магнитных зарядов на поверхности по обе стороны щели. Если рассмотреть небольшой отрезок стержня bb' , заключенный между двумя узкими щелями, то величина момента пары сил, который надо приложить, чтобы повернуть этот отрезок на небольшой угол вокруг оси, перпендикулярной направлению H , должна составлять $[IB]$ на единицу объема отрезка стержня, поскольку магнитная энергия на единицу объема отрезка равна $-(IB)$, что и позволяет рассматривать I как магнитный момент единицы объема данного материала в условиях этого эксперимента.

3. ПРИМЕНЕНИЕ РАССМОТРЕННЫХ ВЫШЕ ВЕЛИЧИН К ОПИСАНИЮ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

Теперь рассмотрим некоторые вопросы, встающие перед изготовителем или потребителем материалов для постоянных магнитов. Обычно имеют дело с малыми стержневыми постоянными магнитами (как, например, участок XX' на рис. 1), располагаемыми в магнитной цепи, например между полюсами магнитного ярма, поле в котором возбуждается током в катушке, намотанной на ярмо. Изменения индукции B можно

определить с помощью измерительной катушки, намотанной на отрезок стержня XX' и последовательно соединенной с флюксметром, а соответствующие изменения H (или $\mu_0 H$) — с помощью магнитного потенциометра. Описания измерительной процедуры можно найти в литературе (³, стр. 85; ⁴, стр. 56). (Самые современные сведения о принятых в промышленности методах магнитных измерений можно найти в готовящемся к выходу в свет сборнике ⁵.)

Таким образом, в принципе нет затруднений в нахождении величин B и H ; их взаимную зависимость можно изобразить графически в координатах B, H или $4\pi I, H$. На рис. 3

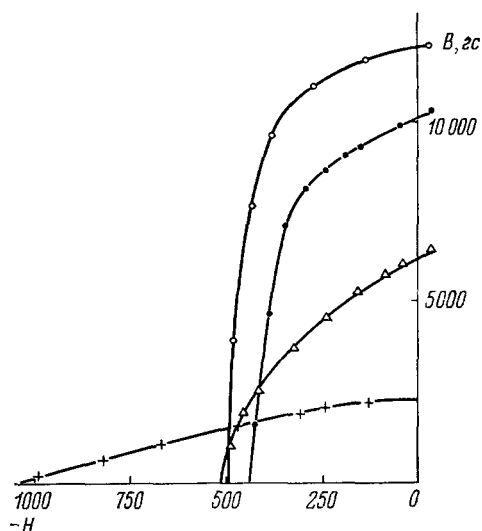


Рис. 3. Кривые размагничивания материалов для постоянных магнитов:

○ — альнико (тиконал), △ — спеченный альнико, ● — алькомакс + Co — Pt; H в ед. [э].

буете приложить дополнительное поле. Между прочим, величина $4\pi I$ иногда в инженерной среде называется удельной намагнитченностью; это неудачно, поскольку термин «удельный» следовало бы резервировать за соответствующей величиной, отнесенной к единице массы, а не к единице объема материала (см. доклад Королевского общества, 1969 г.). На рис. 3 использование различных единиц измерения просто указывает на различие способов определения и измерения величин B и H .

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕДИНИЦ СИСТЕМЫ СИ

Обратимся теперь к использованию единиц системы СИ. Полезно, не боясь повториться, снова записать уравнения

$$B = H + 4\pi I \quad (1)$$

для нерационализированной системы СГС,

$$B = H + I \quad (2)$$

для рационализированной системы СГС и соответствующие уравнения:

$$B = \mu H = (1 + 4\pi\kappa) H, \quad (3)$$

$$B = \mu H (= \mu_r H) = (1 + \kappa) H, \quad (4)$$

приведен такой график ⁹, который может представлять интерес для потребителей ферромагнитных материалов; при его построении использованы единицы СГС. Поучительно строить зависимости B от H и $4\pi I$ от H на одном и том же чертеже; это позволяет иллюстрировать тот факт, что в случае очень жесткого магнитного материала коэрцитивная сила $|_I H_c|$, определенная из графика для $4\pi I$, больше, чем сила $|_B H_c|$, найденная из графика для B . Изготовитель обычно приводит значение второй из них; она часто на несколько десятков и даже сотен эрстед меньше соответствующего значения $|_I H_c|$. Например, для показанного на рис. 3 сплава Co — Pt, для которого $_B H_c = -1040$ э, значение $4\pi I = -_B H_c = +1040$ гс, и для устранения этой остаточной намагнитченности тре-

где мы пока еще используем символ μ , которым до недавнего времени было принято обозначать объемную магнитную восприимчивость материала. Поскольку μ (или μ_r) есть величина безразмерная, то $\mu - 1$ должна быть безразмерной постоянной для ферромагнитного материала при данном приложенном поле и прочих заданных условиях.

При использовании системы СИ можно писать либо

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 (H + I), \quad (5)$$

где

$$\mu_r = 1 + \frac{I}{H},$$

либо

$$B = \mu_r \mu_0 H = \mu_0 H + J, \quad (6)$$

где

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H}.$$

Здесь μ_0 есть магнитная проницаемость вакуума, строго определенная следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ дж} \cdot \text{сек}^2 / \text{к}^2 \cdot \text{м} = \\ &= 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ дж/а}^2 \cdot \text{м} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ в} \cdot \text{сек/а} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (6a)$$

(В системе СИ единицей напряженности магнитного поля является ампер на метр, $1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}$, а единицей плотности магнитного потока — тесла, $1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс} = 1 \text{ в} \cdot \text{сек/м}^2 = 1 \text{ вб/м}^2 = 1 \text{ дж/а} \cdot \text{м}^2$.)

Кроме того, из уравнения (5) видно, что намагничение I выражено в тех же единицах, что и H , что соответствует соглашению, принятому Международным союзом чистой и прикладной физики и Международным союзом чистой и прикладной химии, и включено в доклад Королевского общества о символах, единицах и их сокращенных обозначениях (1969 г.). Из уравнения (6) видно, что магнитная поляризация J имеет ту же размерность, что и магнитная индукция B . Символ J употреблялся теми, кто до сих пор пользовался системой единиц Джорджи (см. ⁶ и ⁴), они же употребляли символ I вместо J в уравнении (6), называя его намагничением. Читатели современных книг по магнетизму должны с самого начала выяснять, какой смысл вкладывают авторы в употребляемые ими символы J или I . Отношение $I/H = J/\mu_0 H$ есть объемная магнитная восприимчивость; по международному соглашению она обозначается как χ_m . Выбор такого обозначения несколько неудачен, поскольку в течение многих лет исследователи, особенно те из них, кто имел дело со слабо магнитными материалами, использовали этот символ для обозначения массовой магнитной восприимчивости $\chi_m = \frac{\kappa}{\rho}$, где ρ — плотность материала. Смит ¹ обратил внимание на преимущества использования обозначения χ_m для молярной магнитной восприимчивости.

Для дальнейшего примем, что стержень из однородного ферромагнитного материала (см. рис. 1) внесен в измеряемое магнитное поле H (или во внешний магнитный поток с плотностью $B_0 = \mu_0 H$). Допустим, что с помощью флюксметра или магнитного потенциометра мы определили значения B , H , I для участка стержня XX' на рис. 1. Предположим, что стержень изготовлен из материала, магнитная индукция которого имеет в верхней правой части кривой намагничивания разумное значение $B = 13\,000 \text{ гс}$ при $H = 200 \text{ э}$. Тогда по уравнениям (1) и (2) находим

$$B = 13\,000 \text{ гс} = 200 + 4\pi I \text{ э}, \quad (1a)$$

$$B = 13\,000 \text{ гс} = 200 + I \text{ э}. \quad (2a)$$

Эти уравнения имеют смысл только, если принять, что здесь единицы гаусс и эрстед используются для магнитных полей, измеренных разными методами; в рамках классической модели «силовых линий» в этих уравнениях нет ничего противоречивого. Оба уравнения (1а) и (2а) дают $\mu - 1 = \mu_r - 1 = 64$.

Используя систему СИ, из уравнения (5) с учетом значения μ_0 из (6а) имеем

$$B = 13\,000 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = \mu_0 \cdot 200 \cdot \frac{10^3}{4\pi} \frac{a}{m} + \mu_0 I$$

или

$$13\,000 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = 200 \cdot 10^{-4} \text{ тл} + \mu_0 I,$$

откуда

$$\mu_0 I = 1,28 \text{ тл} = 1,28 \frac{\text{дж}}{a \cdot m^2}$$

и

$$I = 1,28 \frac{\text{дж}}{a \cdot m^2} / 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{a \cdot \text{сек}}{a \cdot m} = \frac{1,28}{4\pi} \cdot 10^7 \frac{a}{m} = 1,02 \cdot 10^6 \frac{a}{m},$$

$$\mu_r - 1 = 12\,800 \cdot 10^{-4} \text{ тл} / 200 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = 64.$$

Из уравнения (6) имеем

$$13\,000 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = \mu_0 \cdot 200 \cdot \frac{10^3}{4\pi} \frac{a}{m} + J,$$

откуда

$$J = 1,28 \text{ тл} \quad \text{и} \quad \mu_r - 1 = 64.$$

Ранее, когда использовались единицы нерационализированной системы СГС, при построении графиков зависимостей B , $B - H$ или $4\pi I$

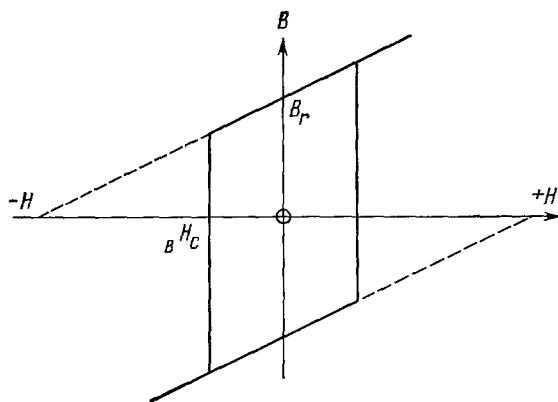


Рис. 4. «Прямоугольная» петля гистерезиса идеального материала для постоянных магнитов.

магнитной поляризации J ; при построении упомянутых графиков по обеим осям тогда используются единицы тесла.

Следует сделать замечание по поводу величины $(BH)_{\max}$, находимой из графика BH в зависимости от H . Эта величина есть мера наибольшей магнитной энергии, которую можно запасти в единице объема ферромагнитного материала; ее также называют критерием Эвершеда пригодности данного материала для использования в магнитных цепях, содержащих постоянные магниты^{3, 7}. В системе СГС эта величина выражается в единицах $\text{гс} \cdot \text{э}/\text{см}^3 = \text{эрг}/\text{см}^3$; в системе СИ она выражается в $(a \cdot \text{сек}/m^2) (a/m) = \text{дж}/m^3$.

от H по осям координат было удобно откладывать величины 10^4 гс (ординаты) и 10^2 э (абсциссы). Теперь же, используя единицы системы СИ, по оси ординат удобно откладывать B в тл, либо I в $10^5 a/m$, либо J в тл, а по оси абсцисс во всех этих случаях H в $10^4 a/m$. Сегодня некоторые авторы предпочитают строить графики зависимости B или $B - B_0$, от B_0 , где B — измеренная плотность магнитного потока; величина B_0 называется плотностью внешнего магнитного потока; разность $B - B_0$, конечно, равна

Проиллюстрируем вычисление количества тепла W , рассеивающегося за один цикл перемагничивания, на простом примере. Для этого возьмем материал с идеальной «прямоугольной» петлей гистерезиса (рис. 4), для которого коэрцитивная сила $|_B H_c| = 200$ э и остаточная намагниченность $B_r = 12\,000$ гс. В системе единиц СГС

$$W = 4 \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot 200 \text{ э} \cdot 12\,000 \text{ гс} = \frac{9,6}{4\pi} \cdot 10^6 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^3},$$

в системе СИ

$$W = 4 \cdot 200 \cdot \frac{10^3}{4\pi} \frac{\text{а}}{\text{м}} \cdot 12\,000 \cdot 10^{-4} \text{ тл} = \frac{9,6}{4\pi} \cdot 10^5 \frac{\text{дж}}{\text{м}^3}.$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для практических расчетов при переводе из системы СГС в систему СИ и обратно нужно запомнить только, что $1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс}$ и $1 \text{ а/м} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ э}$ (т. е. $1 \text{ э} = 79,6 \text{ а/м}$). Исследователям магнетизма без сомнения нужна свобода в выборе единиц измерения. В течение еще многих лет для чтения огромной литературы по магнетизму, в том числе и современных статей о приложениях теории магнетизма в атомной и ядерной физике, нужно будет знать систему СГС. Цель настоящей заметки состояла в том, чтобы показать, что при описании и измерении магнитных свойств макроскопических тел использование системы СИ не вызывает заметных затруднений, вопреки опасениям еще многих исследователей.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА *)

1. D. H. Smith, Contemp. Phys. **11**, 287 (1970).
2. F. Dussler, Ann. Phys. Lpz. **86**, 66 (1928).
3. L. F. Bates, Modern Magnetism (4th Ed.), Cambridge University, 1963.
4. H. Lijlstra, Experimental Methods in Magnetism, vol. 9, 2, p. 56, Selected Topics in Solid State Physics, Amsterdam; North-Holland Co., 1967.
5. Proceedings II European Conf. on Hard Magnetic Materials, Milan, 1969.
6. S. Chikazumi, Physics of Magnetism, London John Wiley & Sons, 1964.
7. R. S. Tebble, D. J. Craink, Magnetic Materials, John Wiley & Sons, 1969.
8. L. F. Bates, Phil. Mag., Series 7, **36**, 297 (1945).
- 9*. L. F. Bates, B. Lloyd-Evans, Proc. Phys. Soc. **45**, 425 (1933).
- 10*. L. F. Bates, F. E. Neale, Proc. Phys. Soc. **63A**, 374 (1950).

*) Литература, отмеченная звездочкой, добавлена редактором перевода. (Прим. ред.)