

АНАЛИЗ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАКСИМАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СТАЛЕЙ

С. Г. САНДОМИРСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск,
Республика Беларусь, e-mail: sand@iaph.bas-net.by

Проведен анализ погрешности измерений максимальной магнитной проницаемости сталей по стандартной методике, обусловленной дискретным изменением амплитуды намагничивающего поля на основной кривой намагничивания по индукции. Показано, что трудоемкость этих измерений может быть снижена при использовании формулы для расчета поля, при котором магнитная проницаемость стали максимальна.

Ключевые слова: ферромагнетик, намагничивание, максимальная магнитная проницаемость.

The measurement error of measurements of steels maximum permeability μ_m by standard procedure caused by discrete change of magnetizing field amplitude on the basic magnetization curve by induction was analyzed. It is shown that the work content of these measurements can be reduced by using of a formula of calculation of field at which the steel permeability is highest possible.

Key words: ferromagnetic, magnetization, maximum permeability.

Основными магнитными параметрами материала, характеризующими его ферромагнитные свойства, являются коэрцитивная сила H_c , остаточная намагниченность M_r и намагниченность M_s технического насыщения. Важным для электротехники, магнитного структурного анализа и контроля напряженно-деформированного состояния сталей параметром, издавна используемым в неразрушающем контроле, является и максимальная магнитная проницаемость μ_m – максимальное значение магнитной проницаемости μ как функции напряженности H магнитного поля на

основной кривой намагничивания по индукции [1]. Исследователи заметили, что чувствительность μ_m к технологическим воздействиям на материал отлична от чувствительности других параметров [2 – 6]. Между тем, измерение μ_m трудоемко: в соответствии с [7] материал намагничивают в замкнутой магнитной цепи до технического насыщения, измеряют его коэрцитивную силу H_c , размагничивают, измеряют не менее десяти значений магнитной индукции B на основной кривой намагничивания (через приблизительно равные интервалы напряженности поля H) в диапазоне изменения H от значения, близкого к $0,5 H_c$ материала, до примерно соответствующего $2H_c$. По результатам каждого измерения подсчитывают μ , строят график зависимости $\mu = \mu(H)$ и получают μ_m . При соблюдении требований [7] к точностям измерений размеров образцов и измерительной аппаратуры относительная погрешность δ измерения μ_m составляет $\pm 5\%$; для M_r и M_s – не более $\pm 3\%$, H_c – $\pm 2\%$; отношения M_r/M_s – $\pm 1\%$ [8]. Такая погрешность измерений μ_m удовлетворяет потребностям практики, но их трудоемкость сдерживает более широкое использование этого параметра.

Целью статьи является анализ методической погрешности измерения μ_m по [7], обусловленной дискретным характером изменения амплитуды намагничивающего поля, и снижение трудоемкости измерения μ_m .

Казалось, трудоемкость измерений μ_m должна уменьшиться с появлением автоматизированных магнитоизмерительных комплексов и установок [9, 10], но этого не произошло. Описание принципа их работы свидетельствует: при «автоматизированном» измерении магнитных параметров происходит измерение магнитной проницаемости не на основной, как требуется в [7], а на начальной кривой намагничивания [11]. Поэтому результаты измерения « μ_m » такой аппаратурой не являются μ_m исследуемых материалов по [1, 7].

Велика ли разница? Вот и авторы [2, 6] не заметили разницы между измерениями начальной магнитной проницаемости μ_n , которую в соответствии с [1] измеряют на начальной или основной кривой намагничивания, и μ_m , которую в соответствии с [1] измеряют только на основной кривой намагничивания. «Измерение начальной проницаемости ферромагнетиков представляет определенную трудность, обусловленную проведением измерений в очень

слабых магнитных полях с последующей экстраполяцией поля к нулю. При увеличении магнитного поля магнитная проницаемость растет и при некотором его значении, называемом полем максимальной магнитной проницаемости H_{μ_m} , достигает максимального значения μ_m , а далее убывает» (процитированные фрагменты в [2] и [6] совпадают). Следствием этого явился выбор методики выполнения измерений (МВИ) магнитных параметров в [8, 9]. Авторы [9] до сих пор не видят разницы между основной и начальной кривыми намагничивания: «По основной кривой намагничивания определялись: начальная μ_n и максимальная μ_m магнитности» [12, 13]. При этом установка [9] оба параметра измеряет на начальной кривой намагничивания.

В [1] приведены следующие формулировки:

основная кривая намагничивания — кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля;

начальная кривая намагничивания по намагниченности (индукции) — кривая, выражающая зависимость намагниченности (магнитной индукции) от напряженности магнитного поля в процессе намагничивания предварительно термически размагниченного магнитного материала при последовательном возрастании напряженности магнитного поля.

В соответствии с этими определениями основная кривая намагничивания является дискретной, для ее построения не обязательно исследуемый материал термически размагничать (достаточно его размагнитить медленно убывающим по амплитуде знакопеременным магнитным полем [7]). Начальная «первого намагничивания» (по [11]) кривая намагничивания — непрерывная кривая, получаемая на термически размагниченном магнитном материале. Значения магнитной индукции в материале на основной кривой намагничивания не совпадают со значениями индукции на начальной кривой при той же амплитуде намагничивающего поля из-за явления магнитной аккомодации [11]. Несоблюдение требования термического размагничивания материала приводит к нестабильности результатов измерений магнитной индукции на начальной кривой намагничивания [11]. Поэтому исследователям не следует удивляться, что результаты измерений μ_m их аппаратурой «подвержены влиянию мешающих

факторов» [13]. При этом они еще и не соответствуют действительным значениям μ_m даже в тех случаях, когда измерения проведены в замкнутой магнитной цепи. Большинство же измерений μ_m , «обобщенных» в [13], проведены на образцах в открытой магнитной цепи, что недопустимо [7, 8, 14].

Для поиска путей снижения трудоемкости измерений μ_m проведем анализ их методической погрешности по [7], обусловленной дискретным характером изменения амплитуды намагничивающего поля.

Для упрощения записи используемых формул введем следующие обозначения:

$$M_r/M_s = K_n; H_c/M_s = \xi; H/H_c = h; \operatorname{tg}[\pi K_n/2] = T, \quad (1)$$

где K_n – коэффициент прямоугольности.

Для анализа, как и в [15], используем зависимость, приведенную на рис. 1 (кривую Столетова), для относительной полной (амплитудной) магнитной проницаемости μ стали от напряженности H действующего магнитного поля [16], которая в обозначениях (1) может быть записана в виде

$$\mu = 1 + \frac{\chi_{\text{нач}}}{1+h^2} + \frac{h}{\pi \xi (\gamma + h^2)} \sum_{n=0}^1 (-1)^n \operatorname{arctg}\{T[1 + (-1)^n h]\}; \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{M_s}{\pi M_c - \chi_{\text{нач}} H_c/2} - 1,$$

где $\chi_{\text{нач}}$ – начальная магнитная восприимчивость материала; M_c – намагниченность по основной кривой намагничивания при $H = H_c$.

В [16] показано, что (2) наиболее точно по сравнению с другими формулами описывает экспериментальные результаты для стали 40X, отпущенной при 200 °С после закалки от 840 °С, и стали ШХ15, закаленной и в состоянии

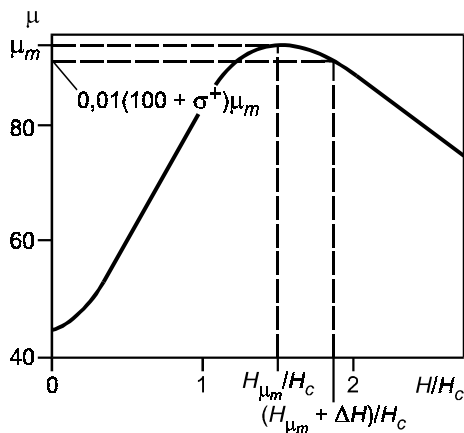


Рис. 1. Кривая Столетова ферромагнитной стали

поставки, магнитные свойства которых достаточно полно охватывают диапазон изменения магнитных параметров сталей.

Применим предложенную в [17] формулу для расчета напряженности поля, при которой магнитная проницаемость сталей достигает максимума:

$$H_{\mu_m} \approx H_c (1,48 - 0,17K_n^2 - (0,07 - 0,06K_n^2)\tau H_c) / \sqrt{K_n}, \quad (3)$$

где $\tau = 1 \text{ м/кА}$ — размерный множитель.

Формула (3) предназначена для определения поля H_{μ_m} сталей (или других ферромагнитных материалов, не содержащих немагнитных включений) по результатам простых и точных измерений H_c , M_s , M_r взамен трудоемкого и неточного измерения H_{μ_m} . В обоснование такой возможности на рис. 2 результаты расчета напряженности по (3) (горизонтальная ось) сопоставлены с результатами ее измерений для нормализованных сталей марок 10, 20, 20К, 35, Д, 45, 15Х, 15ХМ, 36Г2С, 40Х и 30ХГСА по [18, табл. 2] (вертикальная ось). Измерения магнитных свойств сталей в [18] проведены в соответствии с требованиями [7] на тороидальных образцах. Для расчета H_{μ_m} сталей по (3) использованы результаты измерений H_c , остаточной индукции B_r и индукции насыщения B_s этих сталей [18, табл. 2].

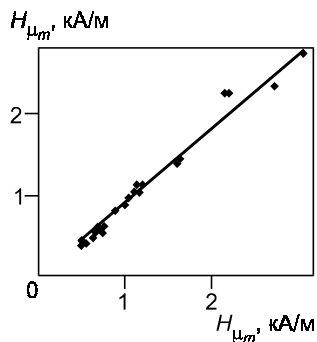


Рис. 2. Сопоставление результатов измерений H_{μ_m} нормализованных сталей по [18] с результатами расчета напряженности поля тех же сталей по (3)

Результаты расчета H_{μ_m} по (3) нормализованных сталей завышены по сравнению с результатами измерений в [18] в среднем на 11 %. Это намного меньше возможной в соответствии с физической сущностью кривой Столетова сталей (см. рис.1) погрешности измерений H_{μ_m} [15]. Статистический анализ результатов расчета по (3) и измерений по [18] H_{μ_m} сталей 31-й марки показал, что коэффициент корреляции между ними превышает 0,99.

Дополнительную погрешность $\sigma^\pm$ измерения μ_m , вызванную отклонением $\pm \Delta H$ напряженности H поля, при котором измерена магнитная проницаемость μ_m , от H_{μ_m} , определим по формуле

$$\sigma^{\pm} = [\mu(H_{\mu_m} \pm \Delta H) - \mu(H_{\mu_m})] \cdot 100 / \mu(H_{\mu_m}), \quad (4)$$

где $\mu(H_{\mu_m} \pm \Delta H)$, $\mu(H_{\mu_m})$ рассчитаны по (2), H_{μ_m} — по (3).

Отметим, что в соответствии с физической сущностью кривой Столетова (см. рис. 1) значения $\sigma^{\pm}$ отрицательны для любого ΔH . Для $|\Delta H| \leq H_{\mu_m}$ верно неравенство $|\sigma^{+}| < |\sigma^{-}|$.

На рис. 3 в качестве примера представлены результаты расчета по (4) зависимостей $\sigma^{\pm}(\Delta H)$ для закаленной стали ШХ15. При расчете $\mu(H_{\mu_m} \pm \Delta H)$ и $\mu(H_{\mu_m})$ по (2) использованы результаты измерений $H_c = 4,75$ кА/м; $M_r = 713$ кА/м; $M_s = 1165$ кА/м; $M_c = 390$ кА/м; $\chi_{\text{нач}} = 44$ из [16, таблица]; при расчете H_{μ_m} по (3) — результаты измерений H_c , M_r и M_s этой стали из той же таблицы в [16]. Вычисленное по (3) значение $H_{\mu_m} = 7,127$ кА/м, рассчитанное по (2) при $H = H_{\mu_m}$ значение $\mu_m = 93,32$. Аналогичные результаты (кривые на рис. 3 практически совпадают) получены и для стали ШХ15 в состоянии поставки при $H_c = 848$ А/м; $M_r = 780$ кА/м; $M_s = 1115$ кА/м; $M_c = 290$ кА/м; $\chi_{\text{нач}} = 110$ [16, таблица]; $H_{\mu_m} \approx 1399$ А/м; $\mu_m \approx 463,1$.

Из рис. 3 следует, что при $|\Delta H| \leq 0,1 H_c$ значение $\sigma^{\pm}$ не превышает по модулю 0,5 %, что на порядок меньше стандартной основной относительной погрешности δ измерения μ_m . Отметим, что при измерении μ_m по МВИ [7] максимально возможное отклонение напряженности H , при котором происходит измерение, от H_{μ_m} не превышает $0,075 H_c$. Результаты проведенного анализа позволяют с учетом установленного по (3) значения H_{μ_m} отказаться от многократных измерений μ при измерении μ_m по МВИ [7]. Та же самая точность будет получена при определении μ всего при трех значениях напряженности поля H : $0,9 H_{\mu_m}$, H_{μ_m} и $1,1 H_{\mu_m}$. Измерения при $H = 0,9 H_{\mu_m}$ и $1,1 H_{\mu_m}$ необходимы для исключения влияния возможной погрешности определения H_{μ_m} по (3) на результат измерения μ_m .

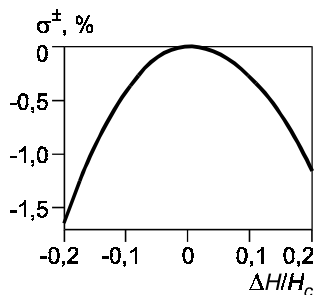


Рис. 3. Зависимость погрешности $\sigma^{\pm}$ измерения μ_m от отклонения ΔH напряженности H от H_{μ_m} для закаленной стали ШХ15

В обоснование возможности использования такой МВИ на рис. 4 представлены результаты моделирования процесса измерения μ_m стали 45, закаленной от 860 °С и отпущенной при 450 °С по предложенной и стандартной МВИ. Неизбежная инструментальная относительная погрешность $\pm 6 \%$ по [8] каждого результата измерения μ на основной кривой намагничивания в окрестности μ_m не позволяет воспользоваться экспериментальными данными для сопоставления точности указанных МВИ. Это сопоставление проведено с применением рассчитанных по (2) значений μ на кривой Столетова. Магнитные параметры стали 45 соответствовали результатам их измерений [3, табл. 3.1]: $H_c = 1,02$ кА/м; $M_r = 1271$ кА/м; $M_s = 1626$ кА/м; $\chi_{нач} = 83$. В соответствии с формулой из [19]:

$$M_c \approx 0,67 (0,476 + 0,0712 \tau H_c) M_r, \quad (5)$$

получено $M_c \approx 467,2$ кА/м.

Из рис. 4 следует практически полное совпадение результатов измерений стали 45 по предложенной ($\mu_m = 641,1$) и стандартной ($\mu_m = 641,4$) МВИ. От данных эксперимента ($\mu_m = 684$ [3, табл. 3.1]) они отличаются (6 %) практически только на инструментальную погрешность измерения. При этом результаты измерений μ на основной кривой намагничивания материала в точках, соседних с измеренным значением μ_m , при использовании предложенной и

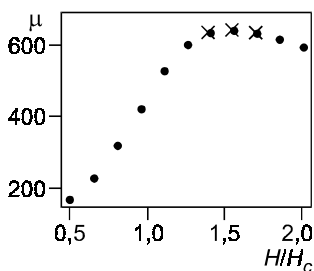


Рис. 4. Результаты моделирования измерения μ_m стали 45 по предложенной (×) и стандартной (●) методикам

стандартной МВИ также практически совпадают. Это обеспечивает равновероятную (и практически незначимую по сравнению с основной стандартной относительной погрешностью измерения μ_m) дополнительную погрешность измерения μ_m по обеим МВИ, обусловленную неточным соответствием рассчитанной по (3) или выбранной по стандартной методике напряженности H_{μ_m} по сравнению с ее действительным значением. Исходя из этого, а также для нивелирования возможных отклонений (до $\pm 15 \%$) результатов расчета напря-

женности по (3) по сравнению с ее действительным значением установлены отклонения $0,9 H_{\mu_m}$ и $1,1 H_{\mu_m}$ для дополнительных измерений μ на основной кривой намагничивания по предложенной МВИ.

Таким образом, для сталей с $H_{\mu_m} \leq 2,1 H_c$ предложенная и стандартная МВИ обеспечивают одинаковую точность измерения μ_m , но в рамках предложенной методики можно выполнить примерно в три раза меньше намагничиваний материала и измерений его магнитных параметров. Для материалов с $H_{\mu_m} \geq 2,1 H_c$ предложенная методика обеспечит и более высокую достоверность измерения μ_m .

Выводы. Современная автоматизированная магнитоизмерительная аппаратура не обеспечивает соблюдения стандартных требований при измерениях максимальной магнитной проницаемости μ_m материалов, поскольку они осуществляются не на основной, а на начальной кривой намагничивания. Такие результаты измерений μ_m имеют нестабильный характер и не соответствуют действительным значениям этой величины.

Дополнительная относительная погрешность измерения μ_m по стандартной МВИ, обусловленная отклонением напряженности поля, при которой проводят измерения, от поля H_{μ_m} , при которой магнитная проницаемость достигает максимума, на порядок меньше основной стандартной относительной погрешности измерения μ_m .

Использование (3) для расчета H_{μ_m} сталей (или других ферромагнитных материалов, не содержащих немагнитных включений) по их коэрцитивной силе, остаточной намагниченности и намагниченности технического насыщения позволяет при измерении μ_m проводить измерения μ на основной кривой намагничивания не при десяти различных значениях намагничивающего поля, как требуется в стандартной МВИ, а всего при трех. При этом предложенная и стандартная МВИ обеспечивают одинаковую точность измерения μ_m , но предложенная методика позволяет сделать это с меньшим числом намагничиваний материала и измерений его магнитных параметров.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **ГОСТ 19693 –74.** Материалы магнитные. Термины и определения.
2. **Михеев М. Н., Горкунов Э. С.** Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993.
3. **Бида Г. В., Ничипурук А. П.** Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2005.
4. **Неразрушающий контроль.** Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 6.
5. **Горкунов Э. С. и др.** Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей // *Физика металлов и металловедение*. 2007. Т. 103. № 3. С. 322– 327.
6. **Бакунов А. С., Горкунов Э. С., Щербинин В. Е.** Магнитный контроль. Учеб. пособие. М.: Издат. дом «Спектр», 2011.
7. **ГОСТ 8.377–80.** Материалы магнитомягкие. Методика выполнения измерений при определении статических магнитных характеристик.
8. **Чернышев Е. Т. и др.** Магнитные измерения. М.: Изд-во стандартов, 1969.
9. **Горкунов Э. С. и др.** Магнитоизмерительный комплекс для магнито-структурных исследований // *Дефектоскопия*. 1999. №3. С. 78–84.
10. **Матюк В. Ф., Осипов А. А.** Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий // *Дефектоскопия*. 2007. № 3. С. 12–25.
11. **Янус Р. И.** Намагничивания кривые // *Физический энциклопедический словарь*. Т. 3. М.: Сов. энциклопедия, 1963. С. 354 – 355.
12. **Матюк В. Ф., Короткевич З. М., Осипов А. А.** Влияние структурных изменений в стали У10А при закалке от разных температур на ее квазистатические магнитные характеристики // *Весці НАН Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. навук*. 2012. №1. С.112–122.
13. **Матюк В. Ф.** Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами (обзор) // *Неразрушающий контроль и техническая диагностика*. 2011. № 1. С. 3–29.
14. **Сандомирский С. Г.** Анализ погрешности измерения магнитной проницаемости ферромагнитного материала в открытой магнитной цепи // *Измерительная техника*. 2010. № 9. С. 57– 61; **Sandomirsky S. G.** Analysis of the error in measuring the magnetic permeability of a ferromagnetic material in an open magnetic circuit // *Measurement Techniques*. 2010. V. 53. N.9. P. 1060–1066.

15. **Сандомирский С. Г.** Анализ погрешности измерения поля максимальной магнитной проницаемости // Измерительная техника. 2011. №12. С. 41–44.

16. **Мельгуй М. А., Шидловская Э. А.** Экспериментальная проверка аналитических выражений для нелинейных свойств ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. 1987. №11. С. 11–18.

17. **Сандомирский С. Г.** Оценочный расчет магнитного поля, при котором магнитная проницаемость сталей достигает максимума // Электричество. 2012. №7. С. 63–68.

18. **Костин В. Н. и др.** Многопараметровые методы магнитной структуроскопии стальных изделий с использованием магнитных свойств вещества // Дефектоскопия. 2004. №3. С. 69–82.

19. **Сандомирский С. Г.** Расчет кривой намагничивания и частных петель гистерезиса конструкционных ферромагнитных материалов по основным магнитным параметрам // Электричество. 2010. №1. С. 61–64.

Дата принятия 01.04.2013 г.

