

УДК 620.179.14

**О ВОЗМОЖНОСТИ И НЕОБХОДИМОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ «ТЕЛА» И «ВЕЩЕСТВА» ПРИ СТРУКТУРОСКОПИИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

***В. Н. КОСТИН, О. Н. ВАСИЛЕНКО***

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Екатеринбург, Россия

UDC 620.179.14

**ON THE POSSIBILITY AND NECESSITY OF LOCAL MEASUREMENT OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF THE «OBJECT» AND «MATERIALS» IN THE STRUCTURESCOPY OF MATERIALS AND PRODUCTS**

***V. N. KOSTIN, O. N. VASILENKO***

**Аннотация.** Показано, что, измеряя магнитное поле в отверстии специальной формы, выполненном в магнитопроводе измерительного преобразователя, и тангенциальную компоненту магнитного поля в межполюсном пространстве преобразователя вблизи поверхности намагничиваемого объекта, можно локально определять относительные значения его магнитных свойств вещества. Показано различие структурной чувствительности магнитных свойств, локально определяемых в координатах «поток – внутреннее поле» (свойства вещества) и в координатах «поток в изделии – ток в обмотках» (свойства «тела»). Показано, что локальное измерение коэрцитивной силы  $H_c$  по величине размагничивающего тока имеет принципиальное ограничение на диапазон измерений. Показана целесообразность локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по величине тангенциальной составляющей магнитного поля в межполюсном пространстве на поверхности контролируемого объекта, т. е. по внутреннему полю. Это позволяет кратно расширить диапазон измеряемых значений  $H_c$ . При этом существенно снижается влияние зазора между преобразователем и объектом, а также форма и размеры контролируемых объектов на результаты измерений.

Показана возможность и целесообразность одновременного измерения и совместного анализа магнитных характеристик вещества и «тела».

**Ключевые слова:** остаточная индукция, индукция коэрцитивного возврата, коэрцитивная сила, размагничивающий ток, внутреннее поле, измерительный преобразователь, аппаратно-программная система.

**Abstract.** It is shown that by measuring the magnetic field in a specially shaped hole made in the magnetic circuit of the measuring transducer and the tangential component of the magnetic field in the interpolar space of the transducer near the surface of the magnetized object, one can locally determine the relative values of its magnetic properties of the material. The difference in the structural sensitivity of magnetic properties, locally determined in the

coordinates «magnetic flux – internal field» (properties of the substance) and in the coordinates «magnetic flux in the object – current in the circuits» (properties of the «object») is shown. It is shown that the local measurement of the coercive force by the magnitude of the demagnetizing current has a fundamental limitation on the measurement range. The expediency of local measurement of the coercive force of ferromagnetic objects by the magnitude of the tangential component of the magnetic field in the interpolar area on the surface of the object (i. e. by the inner field) is shown. This allows you to expand the range of measured values by several times. This significantly reduces the effect of the gap between the transducer and the object, as well as the shape and size of the testing objects on the measurement results.

The possibility and expediency of simultaneous measurement and combined analysis of the magnetic characteristics of a material and a «object» is shown.

**Key words:** residual induction, induction of coercive return, coercive force, demagnetizing current, internal field, measuring transducer, hardware and software system.

Разработка новых способов и устройств локального измерения магнитных параметров в целях структуроскопии ферромагнитных объектов является динамически развивающимся научно-техническим направлением. Это обусловлено высокой чувствительностью статических и динамических магнитных характеристик к изменениям структурно-фазового и напряженно-деформированного состояний ферромагнитных материалов и объектов.

Используемые измерительные средства имеют существенные ограничения, например, измерение коэрцитивной силы по размагничивающему току. Для приставного измерительного преобразователя, представляющего собой двухполюсной U-образный электромагнит со встроенным в его магнитопровод рамочным феррозондом, связь между током размагничивания  $I_c$  и коэрцитивной силой  $H_c$  намагниченного объема однородного контролируемого изделия описываются следующим выражением:

$$I_c = \frac{1}{W} \left[ \frac{R_{F1} U_{сн}}{R_{F1} + R_{\delta} + R_{и}} + U_{сэ} \right], \quad (1)$$

где  $W$  – суммарное количество витков обмоток электромагнита;  $U_{сн}$  и  $U_{сэ}$  – падение магнитного потенциала на изделии и на электромагните при нулевом магнитном потоке в магнитной цепи «приставной преобразователь – контролируемый объект»;  $R_{F1}$ ,  $R_{\delta}$  и  $R_{и}$  – магнитные сопротивления магнитному потоку через воздух между полюсами электромагнита, воздушного зазора между полюсами и изделием и самого изделия соответственно;  $U_{сн} \sim H_c l_{и}$  ( $l_{и}$  – средняя длина магнитной силовой линии в изделии).

Магнитное сопротивление  $i$ -го участка цепи  $R_i = \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i S_i}$  ( $l_i$ ,  $S_i$ ,  $\mu_i$  – длина, площадь поперечного сечения и магнитная проницаемость  $i$ -го участка магнитной цепи соответственно).

Как можно увидеть из выражения (1) и как следует из многочисленных экспериментов, на измерительные возможности и показания коэрцитиметров с измерением размагничивающего тока оказывают влияние следующие основные факторы: размеры и форма контролируемых объектов; размеры и форма используемых приставных электромагнитов; наличие и величина зазоров в магнитной цепи «приставной преобразователь – объект»; степень однородности свойств в намагниченном объеме, что, в свою очередь, является физической основой коэрцитиметрического контроля глубины упрочненных слоев; тип и характеристики нуля-индикатора магнитного потока в цепи «приставной преобразователь – объект». Коэрцитиметры с измерением размагничивающего тока (РТ-коэрцитиметры) получили весьма широкое распространение.

На рис. 1 представлены зависимости показаний коэрцитиметра КИФМ-1 (РТ-коэрцитиметр) от абсолютных значений коэрцитивной силы трех групп образцов. Как видно из рис. 1, для всех типоразмеров образцов по величине размагничивающего тока измерение коэрцитивной силы  $H_c$  более 45...50 А/см невозможно.

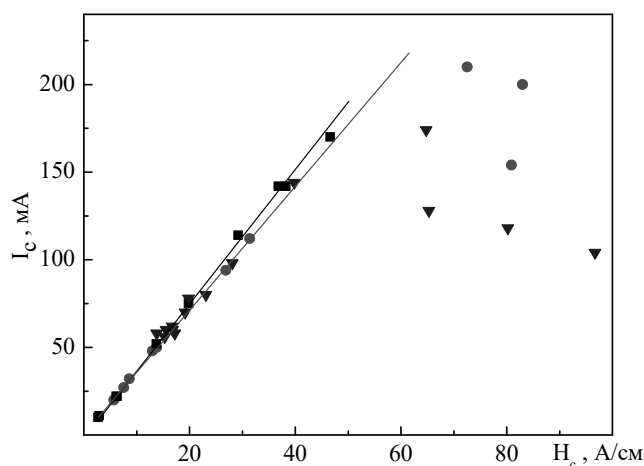


Рис. 1. Зависимость показаний коэрцитиметра КИФМ-1 от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов трех групп: СОКС (■), ОМИ (●) и Н18К9М5Т (▼)

Такое ограничение можно объяснить следующим образом. При отсутствии зазора в магнитной цепи ( $R_g = 0$ ) выражение (1) имеет вид:

$$I_c = \frac{1}{W} \left[ \frac{R_{F1} U_{сн}}{R_{F1} + R_{и}} + U_{сэ} \right]. \quad (2)$$

При  $R_{и} \ll R_{F1}$ , что означает измерение сравнительно небольших значений коэрцитивной силы и достаточно большую площадь поперечного сечения контролируемого объекта, выражение (2) можно переписать в виде

$$I_c = \frac{1}{W} [U_{сн} + U_{сэ}]. \quad (3)$$

Если при этом  $U_{сн} \gg U_{сэ}$ , что является обязательным условием и обеспечивается материалами и конструкцией приставного преобразователя [2], то размагничивающий ток пропорционален измеряемой коэрцитивной силе.

Однако выражение (2) можно также записать в виде

$$I_c = \frac{1}{W} \left[ \frac{U_{сн}}{1 + R_n/R_{F1}} + U_{сэ} \right]. \quad (4)$$

При увеличении измеряемых значений  $H_c$  будет возрастать магнитное сопротивление изделия  $R_n$ , поскольку рост коэрцитивной силы ферромагнетиков практически всегда сопровождается уменьшением их магнитной проницаемости. При  $R_n \rightarrow R_{F1}$  первое слагаемое в (4) будет стремиться к величине  $\frac{U_{сн}}{2}$ , что в сравнении с (3) означает двукратное уменьшение чувствительности к коэрцитивной силе. Однако отношение  $R_n/R_{F1}$  может даже превышать единицу, например при малой площади поперечного сечения контролируемого объекта. Значит при высоких значениях коэрцитивной силы по мере роста магнитного сопротивления изделия  $R_n$  в выражении (4) рост числителя в первом слагаемом будет сопровождаться ростом знаменателя. Это является причиной нарушения пропорциональности между измеряемой величиной  $H_c$  и размагничивающим током  $I_c$ . Сделанный вывод подтверждается данными рис. 1, из которого видно, что при сопоставимых ( $H_c \approx 80$  А/см) значениях коэрцитивной силы образцам Н18К9М5Т с меньшей площадью поперечного сечения соответствуют значительно меньшие значения размагничивающего тока  $I_c$ .

Таким образом, РТ-коэрцитиметрия имеет принципиально ограниченный диапазон измерений как снизу (не более коэрцитивной силы магнитопровода приставного преобразователя), так и сверху.

В [1, 2] показано, что измеряя магнитное поле в отверстии-преобразователе, выполненном в магнитопроводе приставного преобразователя, можно определить относительную величину магнитного потока в контролируемом объекте и, учитывая постоянство площади поперечного сечения намагниченной области испытуемого объекта, определить относительную величину индукции в этой области.

Одновременно с измерением магнитного потока можно измерять тангенциальную составляющую поля на поверхности объекта в межполюсном пространстве. Тангенциальная компонента не терпит разрыва на границе двух

сред, поэтому измеряемое вблизи поверхности поле практически равно внутреннему полю в объекте. Корректное измерение внутреннего поля снимает ограничения на диапазон измеряемых магнитных свойств.

Таким образом, измеряя относительную величину потока и внутреннее поле в испытуемом объекте, можно локально определять его магнитные свойства.

Указанный выше способ был использован в приборах серий SIMTEST и DIUS. На рис. 2 для четырех образцов с размерами  $7,5 \times 34 \times 57$  мм, имеющих различные значения коэрцитивной силы, приведены локально измеренные петли гистерезиса вещества и «тела».

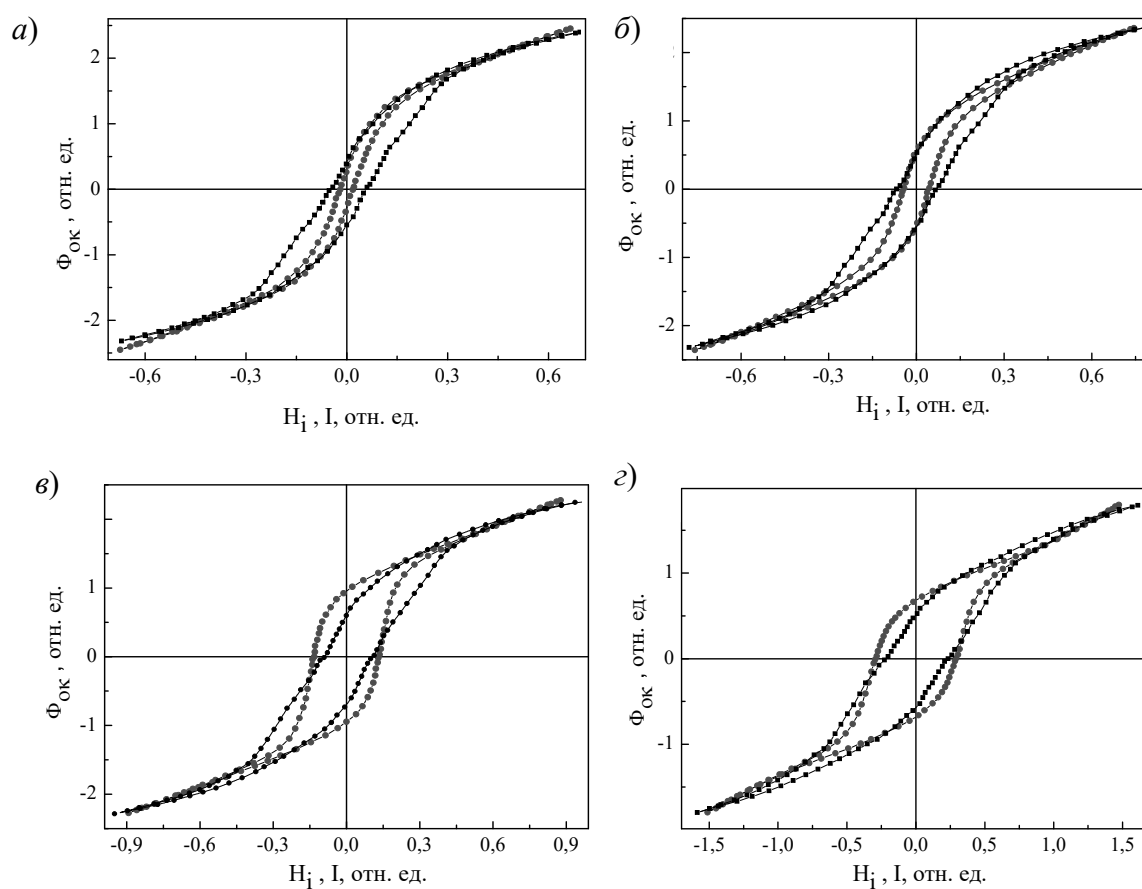


Рис. 2. Локально измеренные петли гистерезиса вещества (●) и «тела» (■) образцов с различными значениями коэрцитивной силы:  $H_c = 2,7$  А/см (а);  $H_c = 6,3$  А/см (б);  $H_c = 19,8$  А/см (в);  $H_c = 46,6$  А/см (г)

Петля гистерезиса в координатах «поток в объекте – ток в обмотках» может быть измерена на объектах любых размеров и формы. В этом случае измерение коэрцитивной силы «тела» аналогично измерениям с помощью известного коэрцитиметра КИФМ-1 и может использоваться для решения такого же широкого круга задач.

Совокупный анализ свойств вещества и «тела» дает гораздо больше возможностей для структуроскопии. Ранее в наших работах было показано,

как дополнительный учет характеристик «тела» позволяет уменьшить мешающее влияние неконтролируемого зазора в цепи «преобразователь – объект» на результаты локального измерения таких магнитных параметров вещества, как индукция коэрцитивного возврата и коэрцитивная сила.

Для практической реализации указанных выше измерительных возможностей разработана отвечающая современным требованиям мобильная аппаратно-программная система DIUS-1.15M.

Таким образом, было показано, что:

- измерение магнитного потока в испытываемых объектах по полю в отверстии-преобразователе, выполненном в магнитопроводе намагничивающего устройства, и измерение внутреннего поля в объекте путем измерения тангенциальной составляющей поля вблизи поверхности объекта позволяют локально определять весь комплекс магнитных свойств вещества ферромагнитных объектов;

- различие структурной чувствительности магнитных свойств локально определяемых в координатах «поток – внутреннее поле» и «поток в изделии – ток в обмотках». Показана целесообразность одновременного измерения и совместного анализа магнитных характеристик вещества и «тела»;

- определение коэрцитивной силы с помощью обычного двухполюсного преобразователя по величине тангенциальной компоненты магнитного поля, измеряемой вблизи поверхности испытываемого объекта в межполюсном пространстве, позволяет существенно расширить диапазон измерений;

- разработанная мобильная аппаратно-программная система DIUS-1.15M может применяться для решения широкого круга задач магнитной структуроскопии ферромагнитных изделий при наличии корреляционной связи между контролируемыми параметрами и измеряемыми устройством магнитными свойствами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kostin, V. N.** DIUS-1.15M. Mobile Hardware–Software Structuroscopy System / V. N. Kostin, O. N. Vasilenko, A. V. Byzov // Russian journal of nondestructive testing. – 2018. – Vol. 54. – P. 654–661.

2. О преимуществах локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов по внутреннему полю / В. Н. Костин [и др.] // Дефектоскопия. – 2020. – Vol. 7. – P. 21–27.

E-mail: kostin@imp.uran.ru; vasilenko@imp.uran.ru.