

## О ПРЕИМУЩЕСТВАХ ЛОКАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ВНУТРЕННЕМУ ПОЛЮ

© 2020 г. В.Н. Костин<sup>1,2,\*</sup>, О.Н. Василенко<sup>1,2,\*\*</sup>, А.В. Михайлов<sup>1,2</sup>, Н.П. Лукиных<sup>1</sup>,  
Д.Г. Ксенофонтов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,  
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

<sup>2</sup>ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,  
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19  
E-mail: \*kostin@imp.uran.ru; \*\*vasilenko@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 20.05.2020; после доработки 29.05.2020  
Принята к публикации 02.06.2020

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, то есть по внутреннему полю. Это позволяеткратно расширить диапазон измеряемых значений  $H_c$ . Кроме того, существенно снижается влияние зазора между преобразователем и объектом, а также форма и размеры контролируемых объектов на результаты измерений. Это делает возможным измерение абсолютных значений  $H_c$  однородных ферромагнитных объектов, а также измерение коэрцитивной силы объектов с неферромагнитными покрытиями значительной толщины.

*Ключевые слова:* коэрцитивная сила, размагничивающий ток, тангенциальная составляющая поля, внутреннее поле, приставной преобразователь, зазор.

**DOI:** 10.31857/S0130308220070039

В настоящее время наиболее распространенным способом локального измерения коэрцитивной силы является предложенный еще в середине прошлого века [1, 2] способ, основанный на намагничивании до насыщения участка ферромагнитного объекта с помощью U-образного двухполюсного электромагнита, образующего с испытуемым объектом контроля замкнутую магнитную цепь, последующем размагничивании и регистрации размагничивающего тока в катушках электромагнита, приводящего к нулевому потоку в этой цепи [3—11]. Этот размагничивающий ток  $I_c$  пропорционален средней величине коэрцитивной силы намагниченного (контролируемого) объема контролируемого объекта. Градуировка или калибровка проводятся по стандартным образцам коэрцитивной силы (СОКС). Однако результаты такой градуировки не могут быть использованы при контроле объектов, имеющих существенно отличающиеся от СОКС размеры и форму.

Для приставного измерительного преобразователя, представляющего собой двухполюсной U-образный электромагнит со встроенным в его магнитопровод рамочным феррозондом (нуль-индикатор магнитного потока), связь между током размагничивания  $I_c$  и коэрцитивной силой  $H_c$  намагниченного объема однородного контролируемого изделия описывают следующим выражением [4, 5, 10]:

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

где  $W$  — суммарное количество витков обмоток электромагнита;  $U_{\text{сн}}$  и  $U_{\text{сэ}}$  — падение магнитного потенциала на изделии и на электромагните при нулевом магнитном потоке в магнитной цепи «приставной преобразователь — контролируемый объект»;  $R_{F1}$ ,  $R_{\delta}$  и  $R_{\text{и}}$  — соответственно магнитные сопротивления магнитному потоку через воздух между полюсами электромагнита, воздушного зазора между полюсами и изделием и самого изделия;  $U_{\text{сн}} \sim H_c I_{\text{и}}$  ( $I_{\text{и}}$  — 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: а) размеры и форма контролируемых объектов

[1—12]; б) размеры и форма используемых приставных электромагнитов [2, 3—5, 10—12]; в) наличие и величина зазоров в магнитной цепи «приставной преобразователь — объект» [4—8]; г) степень однородности свойств в намагниченном объеме, что, в свою очередь, является физической основой коэрцитиметрического контроля глубины упрочненных слоев [2—5, 10]; тип и характеристики нуля-индикатора магнитного потока в цепи «приставной преобразователь — объект» [6—8, 11—13]. Коэрцитиметры с измерением размагничивающего тока (далее для краткости будем называть их РТ-коэрцитиметрами) получили весьма широкое распространение.

Вместе с тем имеется ряд работ [12—17], в которых для определения коэрцитивной силы предлагается в момент равенства нулю магнитного потока в цепи «приставной преобразователь — объект» измерять величину тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности намагничиваемой области контролируемого объекта с помощью малогабаритных датчиков поля<sup>1</sup>. Измеряемое таким образом поле  $H_c$  равно коэрцитивной силе однородного объекта. Такие устройства коротко можно назвать Н-коэрцитиметрами.

Целью настоящей работы является сопоставительное исследование возможностей и определение перспектив РТ-коэрцитиметров и Н-коэрцитиметров.

### ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения возможностей локального измерения коэрцитивной силы были использованы образцы трех типоразмеров. Вариация свойств в широком диапазоне достигалась выбором марки стали и последующей термической обработкой (отжиг, закалка, отпуск). Комплект стандартных образцов предприятия СОКС состоял из прямоугольных параллелепипедов с размерами 57×34×7,6 мм. Комплект стандартных образцов предприятия ОМИ состоял из пластин с размерами 90,0×40,1×4,6 мм. Третья группа образцов состояла из закаленных от 790 °С и отпущенных (состаренных) при различных температурах образцов из стали Н18К9М5Т с размерами 60×10×6 мм.

Абсолютные значения коэрцитивной силы пластин ОМИ и образцов из стали Н18К9М5Т измеряли в замкнутой магнитной цепи (пермеатре) с помощью измерительного комплекса REMAGRAPH C-500 производства фирмы Magnet-Physik Dr. Steingroever GmbH, Германия (<http://www.magnet-physik.de/1.html>). Коэрцитивная сила образцов СОКС была измерена методом сдвигания катушки с образца [19] при намагничивании в соленоиде с максимальным полем 800 А/см. Погрешность измерения коэрцитивной силы в обоих случаях не превышала 2 %.

Измерение коэрцитивной силы по величине размагничивающего тока выполнили с помощью коэрцитиметра КИФМ-1, с сечением полюсов 20×40 мм, в котором в качестве нуля-индикатора магнитного потока используется рамочный феррозонд [4, 5].

Измерение коэрцитивной силы по величине внутреннего поля проводили с помощью аппаратно-программной системы DIUS-1.15M [13, 16] и магнитного мультитестера ММТ-3 с неэлектрическим устройством намагничивания [13, 20].

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

**1. РТ-коэрцитиметрия.** На рис. 1 представлены зависимости показаний коэрцитиметра КИФМ-1, измеряющего коэрцитивную силу по размагничивающему току, 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. Это также отмечалось в работах [2—5, 10].

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

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

<sup>1</sup>Поскольку тангенциальная составляющая поля не терпит разрыва на границе сред [18], то измеряемое малогабаритными датчиками поле на поверхности будет равно внутреннему полю.

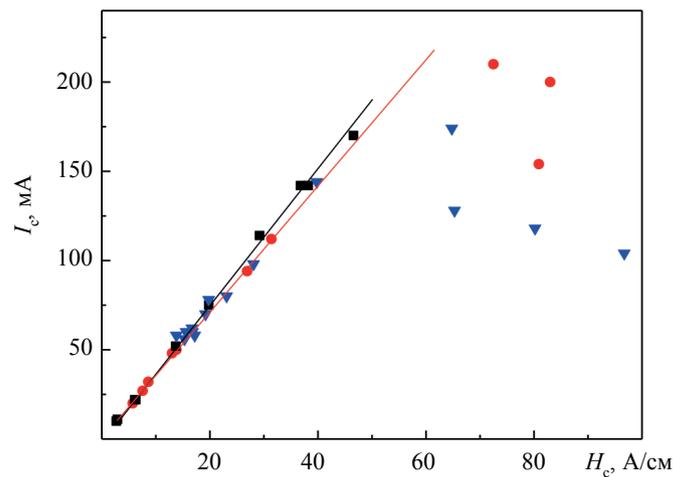


Рис. 1. Зависимость показаний коэрцитиметра КИФМ-1 от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов трех групп: СОКС (■), ОМИ (●) и Н18К9М5Т (▼).

Если при этом  $U_{\text{си}} \gg U_{\text{сз}}$ , что является обязательным условием и обеспечивается материалами и конструкцией приставного преобразователя [2—5], то размагничивающий ток пропорционален измеряемой коэрцитивной силе.

Однако выражение (2) можно также записать в виде

$$I_c = \frac{1}{W} \left[ \frac{U_{\text{си}}}{1 + R_{\text{и}}/R_{\text{F1}}} + U_{\text{сз}} \right]. \quad (4)$$

При увеличении измеряемых значений  $H_c$  будет возрастать магнитное сопротивление изделия  $R_{\text{и}}$ , поскольку рост коэрцитивной силы ферромагнетиков практически всегда сопровождается уменьшением их магнитной проницаемости [21]. При  $R_{\text{и}} \rightarrow R_{\text{F1}}$  первое слагаемое в (4) будет стремиться к величине  $\frac{U_{\text{си}}}{2}$ , что в сравнении с (3) означает двукратное уменьшение чувствительности к коэрцитивной силе. Однако отношение  $R_{\text{и}}/R_{\text{F1}}$  может даже превышать единицу, например, при малой площади поперечного сечения контролируемого объекта. Значит при высоких значениях коэрцитивной силы по мере роста магнитного сопротивления изделия  $R_{\text{и}}$  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 [2—5]), так и сверху.

**2. Н-коэрцитиметрия.** Измерение коэрцитивной силы по внутреннему полюлю можно выполнять в значительно большем диапазоне величин  $H_c$  [12—17]. При этом могут использоваться различные типы намагничивающих устройств: U-образные электромагниты [12, 13, 16, 17], двухполюсные устройства на постоянных магнитах [13, 14], устройства без магнитопровода [15]. Принципиально важным условием остается намагничивание испытуемой области изделия до близкого к техническому насыщению состояния.

На рис. 2 представлен градуировочный график измерения коэрцитивной силы в диапазоне (2,5—87) А/см, полученный с помощью АПС DIUS-1.15М, в которой для намагничивания использован U-образный электромагнит с сечением полюсов 12×28 мм. Как видно из рисунка, линейная зависимость показаний прибора от величины  $H_c$  имеется только в диапазоне (2,5—47) А/см. При более высоких значениях коэрцитивной силы показания АПС DIUS-1.15М имеют пониженные значения. Предполагаемой причиной такого отклонения может быть недостаточный уровень намагничивания испытуемой зоны образцов.

Для проверки сделанного предположения на тех же образцах измерения коэрцитивной силы были выполнены с помощью магнитного мультитестера ММТ-3 с таким же, как у АПС DIUS-

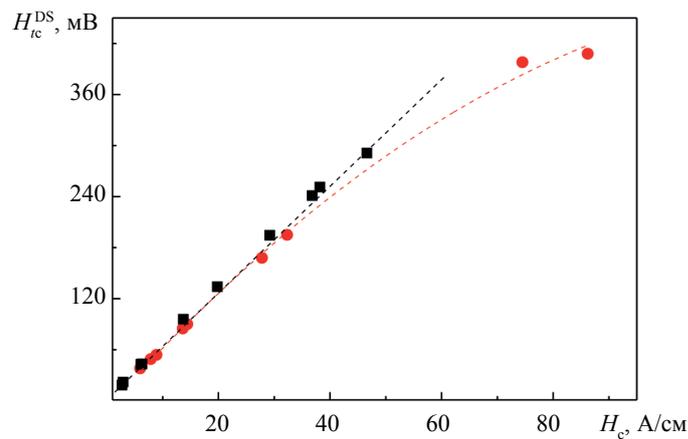


Рис. 2. Градуировочная зависимость показаний АПС DIUS-1.15М от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов СОКС и ОМИ.

1.15М сечением полюсов  $12 \times 28$  мм, но с использованием для намагничивания встроенного в U-образный магнитопровод вращающегося ротора, содержащего сильный постоянный магнит. Магнитный поток  $\Phi_{и}$ , создаваемый таким устройством, существенно больше, чем максимальный магнитный поток устройства DIUS-1.15М. На рис. 3 представлены внешний вид, схема неэлектрического устройства намагничивания и зависимость показаний магнитного мультитестера ММТ-3 от коэрцитивной силы образцов, меняющейся в диапазоне (2,5—87) А/см. Видно, что в этом случае линейная зависимость сохраняется во всем исследованном диапазоне изменения величины  $H_c$  (коэффициент корреляции  $R = 0,997$ ).

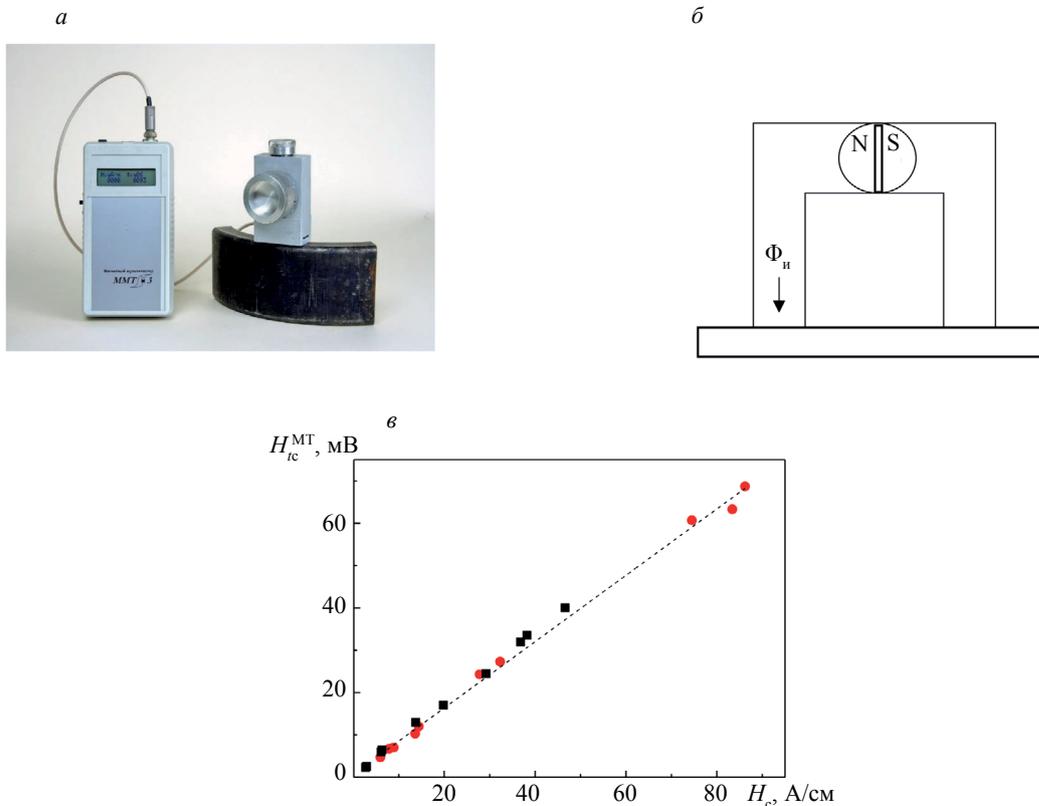


Рис. 3. Внешний вид (а), неэлектрическое намагничивающее устройство (б) и зависимость коэрцитиметрических показаний (в) магнитного мультитестера ММТ-3 от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов СОКС и ОМИ.

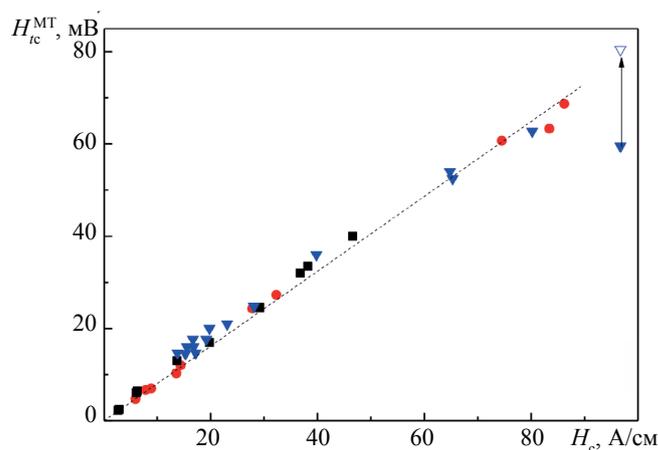


Рис. 4. Зависимость коэрцитиметрических показаний магнитного мультитестера ММТ-3 от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов различных типоразмеров: СОКС (■), ОМИ (●), Н18К9М5Т (▼), составной образец (▽).

Для получения более общих закономерностей прибором ММТ-3 коэрцитивная сила была измерена на всех типоразмерах образцов. При этом диапазон изменения величины  $H_c$  составил (2,7—97) А/см. Полученные результаты представлены рис. 4. Как видно, практически все результаты достаточно хорошо укладываются на исходящую из начала координат прямую линию. Это означает, что результаты измерения по внутреннему полю слабо зависят от формы и размеров образцов.

Однако исключением является образец с самой большой коэрцитивной силой  $H_c = 96,7$  А/см. Этот образец имеет также самую маленькую максимальную магнитную проницаемость ( $\mu_{\max} = 19,9$ ). Ближайший по свойствам образец этой стали имеет максимальную проницаемость в 1,5 раза больше. Учитывая эти данные, а также то, что площадь поперечного сечения образцов Н18К9М5Т намного (в 5,6 раза) меньше площади поперечного сечения полюсов прибора ММТ-3, было сделано предположение, что при намагничивании высококоэрцитивного образца вследствие его высокого магнитного сопротивления значительная часть намагничивающего потока может замыкаться между полюсами через воздух, что не позволяет намагнитить этот образец до технического насыщения.

Для проверки этого предположения на образец с  $H_c = 96,7$  А/см с внешней стороны был наложен образец с  $H_c = 80,2$  А/см и с помощью мультитестера ММТ-3 была измерена коэрцитивная сила этого «составного» образца. Результат показан отдельной точкой на рис. 4. Несмотря на то, что высококоэрцитивный образец шунтировался образцом с меньшей коэрцитивной силой, показания прибора ММТ-3 значительно выросли. Это можно объяснить уменьшением магнитного сопротивления «составного» образца за счет увеличения его площади поперечного сечения и, следовательно, более эффективным его намагничиванием.

Таким образом, при намагничивании испытуемых объектов до близкого к техническому насыщению состояния измерение тангенциальной составляющей магнитного поля на поверхности объекта в межполюсном пространстве (т.е. измерение внутреннего магнитного поля) обеспечивает по меньшей мере двукратное увеличение измеряемых значений  $H_c$  в сравнении с коэрцитиметрией по размагничивающему току.

**3. Влияние зазора.** Как видно из выражения (1), на показания РТ-коэрцитиметров непосредственное влияние оказывает зазор ( $d$ ) между полюсами приставного преобразователя и поверхностью контролируемого объекта. На рис. 5 приведены зависимости показаний коэрцитиметра КИФМ-1 и мультитестера ММТ-3 от коэрцитивной силы образцов СОКС, определенные в отсутствие зазора в магнитной цепи и при зазоре в 1 мм. Видно, что зазор привел к уменьшению показаний коэрцитиметра более, чем на 33 %, а показания прибора ММТ-3 уменьшились менее, чем на 9 %.

Таким образом, чувствительность к зазору при измерении  $H_c$  по внутреннему полю в разы меньше, чем при измерении по размагничивающему току.

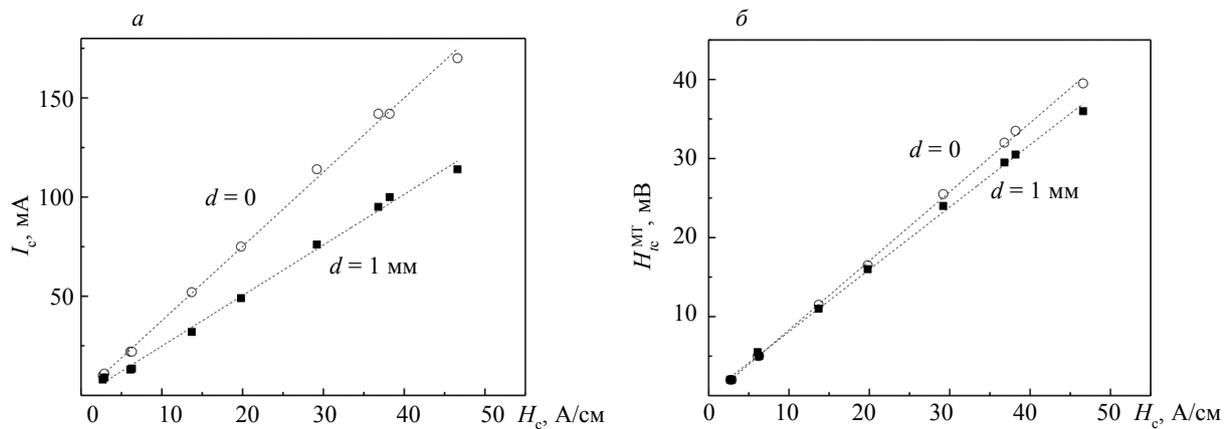


Рис. 5. Влияние зазора на зависимости показаний коэрцитиметра КИФМ-1 (а) и прибора ММТ-3 (б) от абсолютных значений коэрцитивной силы образцов СОКС.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что локальное измерение коэрцитивной силы с помощью приставного преобразователя с U-образным электромагнитом по величине размагничивающего тока имеет принципиальное ограничение на диапазон измерений. Ограничение максимальной измеряемой величины  $H_c$  обусловлено меньшей величиной магнитного сопротивления контролируемого изделия.

2. Показано, что определение коэрцитивной силы с помощью двухполюсного преобразователя по величине тангенциальной компоненты магнитного поля, измеряемой вблизи поверхности испытуемого объекта в межполюсном пространстве, то есть по внутреннему полю, позволяет существенно расширить диапазон измерений. Верхняя граница измерений определяется только возможностью намагничивания контролируемого объекта, то есть размерами и формой преобразователя, и создаваемой им магнитодвижущей силой.

3. Показано, что результаты измерения коэрцитивной силы по внутреннему полю практически не зависят от формы и размеров испытуемых объектов и слабо зависят от величины зазора между поверхностью объекта и преобразователем. Это делает возможным измерение абсолютных значений коэрцитивной силы однородных ферромагнитных объектов, а также измерение коэрцитивной силы объектов с ферромагнитными покрытиями значительной толщины.

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев М.Н. Магнитный метод контроля твердости и микроструктуры стальных труб // Завод. лаб. 1938. № 10. С. 1155—1160.
2. Михеев М.Н., Неизвестнов Б.М., Морозова В.М., Сурин Г.В. Коэрцитиметры с приставными электромагнитами // Дефектоскопия. 1969. № 2. С. 131—133.
3. Загайнов А.В., Ульянов А.И., Петров Р.П., Новиков С.Г. Приборы для контроля качества ферромагнитных изделий по величине коэрцитивной силы // Дефектоскопия. 1991. № 10. С. 60—64.
4. Горкунов Э.С., Захаров В.А. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами (Обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69—88.
5. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 3—28.
6. Безлюдько Г.Я., Мужижский В.Ф., Ремезов В.Б. Серия портативных приборов-структуроскопов, основанных на измерении величины коэрцитивной силы // Дефектоскопия. 2003. № 4. С. 43—51.
7. Ничипурук А.П., Бида Г.В., Царькова Т.П. и др. О снижении влияния зазора на результаты коэрцитиметрии при учете свойств приставного преобразователя // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 45—53.
8. Костин В.Н., Василенко О.Н. О некоторых новых возможностях локального измерения коэрцитивной силы ферромагнитных объектов // Дефектоскопия. 2012. № 7. С. 15—25.
9. Шубочкин А.Е. Применение коэрцитиметрии при комплексном контроле нефтегазопромысловых трубопроводов // Контроль. Диагностика. 2014. № 8. С. 18—22.

10. *Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н.* и др. Коэрцитиметрический контроль качества стальных деталей. Уральская школа коэрцитиметрии // В мире неразрушающего контроля. 2015. № 18. С. 9—13.
11. *Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В.* Измерение коэрцитивной силы в локальной области образца // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 27—32.
12. *Костин В.Н., Царькова Т.П., Сажина Е.Ю.* Измерение относительных значений магнитных свойств вещества контролируемых изделий в составных замкнутых цепях // Дефектоскопия. 2001. № 1. С. 15—26.
13. *Костин В.Н., Осинцев А.А., Сташков А.Н.* и др. Мобильные средства многопараметровой магнитной структуроскопии // Дефектоскопия. 2008. № 4. С. 66—77.
14. *Захаров В.А., Молин С.М., Леньков С.В.* Контроль структуры ферромагнитного материала по напряженности магнитного поля между полюсами приставного двухполюсного намагничивающего устройства // Дефектоскопия. 2017. № 2. С. 53—59.
15. *Реутов Ю.Я., Пудов В.И.* Аппаратура для контроля ферромагнитных изделий с малой коэрцитивной силой // Дефектоскопия. 2017. № 12. С. 40—45.
16. *Kostin V.N., Vasilenko O.N., Byzov A.V.* DIUS-1.15M Mobile Hardware–Software Structuroscopy System // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018. V. 54. P. 654—661. [*Костин В.Н., Василенко О.Н., Бызов А.В.* Мобильная аппаратно-программная система магнитной структуроскопии DIUS-1.15M // Дефектоскопия. 2018. № 9. С. 37—43.]
17. *Gobov Yu.L., Zhakov S.V., Mikhailov A.V.* et al. Coercimetry with Magnetization by a U-Shaped Electromagnet // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2019. V. 55. No. 12. P. 935—941. [*Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В., Реутов Ю.Я.* Метод коэрцитиметрии при намагничивании П-образным электромагнитом // Дефектоскопия. 2019. № 12. С. 42—48.]
18. *Иродов И.Е.* Основные законы электромагнетизма / Учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1983. 279 с.
19. *Чечерников В.И.* Магнитные измерения. М.: Изд-во МГУ, 1969. 387 с.
20. *Пудов В.И., Костин В.Н., Сташков А.Н., Осинцев А.А.* Устройство для локального намагничивания ферромагнитных изделий. Патент РФ на изобретение № 2250475. Бюлл. № 11, 20.04.2005.
21. *Вонсовский С.В., Шур Я.С.* Ферромагнетизм. М.—Л.: ОГИЗ. Гостехиздат, 1948. 816 с.