

## МЕТОД КОЭРЦИТИМЕТРИИ ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ П-ОБРАЗНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ

© 2019 г. Ю.Л. Гобов<sup>1,\*</sup>, С.В. Жаков<sup>1</sup>, А.В. Михайлов<sup>1,2</sup>, Ю.Я. Реутов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Россия 620108 Екатеринбург,  
ул. Софьи Ковалевской, 18

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
Россия 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

\*E-mail: go@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 20.06.2018; после доработки 06.09.2019

Принята к публикации 04.10.2019

Предложен метод измерения коэрцитивной силы с помощью П-образного электромагнита при наличии зазора между полюсами электромагнита и исследуемым образцом. Показана возможность работы устройства в динамическом режиме при импульсном перемагничивании. Проведено сравнение численного моделирования и экспериментальных результатов.

*Ключевые слова:* коэрцитивная сила по намагниченности, намагничивающее устройство, датчик Холла, тангенциальная компонента поля.

DOI: 10.1134/S0130308219120054

### ВВЕДЕНИЕ

Наличие устойчивых связей между магнитными и механическими свойствами ферромагнитных материалов является основой магнитного структурного анализа. При этом коэрцитивная сила является удобной характеристикой, позволяющей устанавливать связь магнитных и структурных параметров. Наиболее современным методом измерения коэрцитивной силы являются предложенный Ф. Фёрстером метод «точечного полюса». В монографиях и статьях по магнитному методу контроля [1—10] отмечается недостаточность анализа реальных достижений и трудностей применения метода «точечного полюса», что сдерживает его развитие. По этой причине и по сей день является актуальным метод определения коэрцитивной силы с использованием приставного П-образного электромагнита с датчиком, измеряющим поток магнитной индукции в приставном электромагните. Область между полюсами электромагнита сначала намагничивается до насыщения, а затем перемагничивается до точки, в которой магнитный поток в приставном электромагните становится равным нулю. Предполагается, что в этой точке ток размагничивания в электромагните или поле, измеренное между полюсами электромагнита, пропорциональны коэрцитивной силе перемагничиваемого образца [11—14].

При таком методе результаты измерения коэрцитивной силы существенно зависят от геометрических размеров измеряемого образца и от величины зазора между образцом и полюсами намагничивающего устройства [15]. Полностью избавиться от зазора во время измерений довольно сложно вследствие загрязненной, корродированной поверхности или наличия немагнитных покрытий на объектах контроля. Величина зазора может быть весьма существенной, порядка 1—3 мм и более, что вносит неприемлемую величину погрешности при измерениях коэрцитивной силы.

В настоящее время существуют методы измерения коэрцитивной силы с уменьшенным влиянием зазора и размеров образца [11, 12, 15—18]. Эти методы работают либо в узких диапазонах изменяющихся параметров, либо сильно снижают точность определения измеряемой величины. Кроме того, в промышленности необходимы приборы, обладающие мобильностью, простотой использования и позволяющие проводить оперативный контроль изделия.

Основной причиной вышеописанных недостатков современных коэрцитиметров является тот факт, что в основном эти приборы измеряют коэрцитивную силу с высокой чувствительностью только при отсутствии зазора между приставным электромагнитом и исследуемым образцом. При появлении зазора чувствительность сильно снижается, поэтому при разработке коэрцитиметров и измерениях коэрцитивной силы стремятся к минимизации зазора. В данной работе предложено расширить диапазоны измерения и повысить точность контроля за счет того, что измерения всегда будут проводиться при отличном от нуля зазоре. В таком случае необходимо разработать бесконтактный метод коэрцитиметрии, учитывающий два типа зазоров между приставным устройством

и исследуемым объектом: постоянного, изначально заданного зазора 0,5—1 мм и возможного дополнительного зазора 1—3 мм.

Целью настоящей работы является разработка метода определения коэрцитивной силы, обеспечивающего при достаточно большом зазоре высокую точность и оперативность измерений.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ БЕСКОНТАКТНОГО МЕТОДА

В настоящей работе для измерения коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{cm}$  предлагается использовать П-образный электромагнит и только один датчик Холла, расположенный в межполюсном пространстве для измерения тангенциальной составляющей магнитного поля вблизи поверхности исследуемого образца (рис. 1). Величиной коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{cm}$  является внутреннее магнитное поле, при котором намагниченность образца становится равной нулю (для магнитомягких материалов коэрцитивная сила по намагниченности  $H_{cm}$  практически не отличается от коэрцитивной силы по индукции  $H_{cb}$ ). Таким образом, для измерения  $H_{cm}$  необходимо первоначально намагнитить исследуемую область по предельной кривой намагничивания, затем создать в ней магнитное поле, направленное против вектора намагниченности и измерить внутреннее поле в этой области. Фиксируя магнитное поле, при котором исчезает намагниченность образца, можно определить величину коэрцитивной силы по намагниченности [17]. Поскольку касательная к поверхности компонента магнитного поля непрерывна на границе образца, то, измеряя магнитное поле вблизи поверхности, можно напрямую измерять внутреннее магнитное поле в образце и коэрцитивную силу. В результате задача разбивается на два этапа: во-первых, необходимо создать достаточно сильное поле, чтобы перемагничивать образец по предельной петле гистерезиса, а во-вторых – корректно измерить внутреннее поле в исследуемой области образца.

Намагничивание массивных образцов сопряжено с «растеканием» магнитного потока по сечению образца, поэтому массивный образец сложно намагнитить до насыщения и обеспечить перемагничивание по предельной петле гистерезиса. Такой вариант пригоден для измерения относительно тонких образцов. Под термином «тонкий образец» в данном случае подразумевается, что соотношение толщины образца и размера полюсов намагничивающего устройства таково, что обеспечивается однородное намагничивание по сечению образца, то есть сечение полюсов должно быть больше сечения образца.

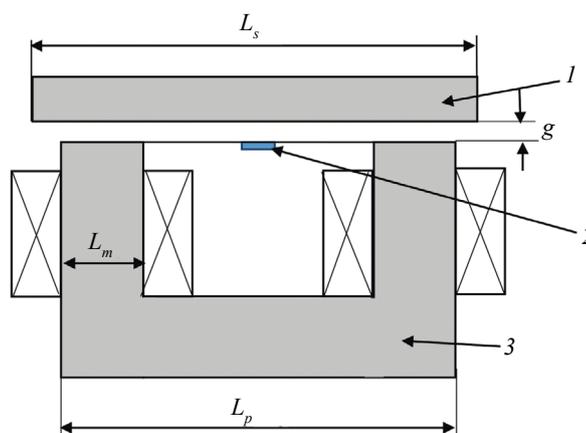


Рис. 1. Схема эксперимента:

1 — контролируемый образец; 2 — датчик Холла, 3 — магнитопровод намагничивающего устройства;  $g$  — зазор между магнитопроводом и образцом.

Предлагаемая схема эксперимента при намагничивании параллельно поверхности приведена на рис. 1. Используется приставной П-образный электромагнит, измеряется касательная к поверхности образца компонента магнитного поля вблизи поверхности образца в центре между полюсами намагничивающего устройства.

Идея предлагаемого метода аналогична изложенной в работах [10, 19]. Исследуемая область намагничивается внешним полем до технического насыщения. Затем ток в электромагните выключается, далее включается ток, создающий магнитное поле, противоположное первоначальному и контролируемая область размагничивается. Магнитное поле, при котором намагниченность

в контролируемой области становится равной нулю, представляет собой коэрцитивную силу по намагниченности.

Предлагаемый в данной работе алгоритм измерения коэрцитивной силы состоит в следующем. На первом этапе проводится калибровка прибора. Для этого строится зависимость магнитного поля на датчике от тока в намагничивающей катушке при отсутствии образца  $H_0(J)$ . Получается прямая, проходящая через ноль, поскольку для сердечника намагничивающего устройства используется материал с коэрцитивной силой, близкой к нулю. Наклон прямой в этом случае определяется размагничивающим фактором сердечника намагничивающего устройства. Любая точка на этой линии соответствует отсутствию намагниченности вне сердечника электромагнита. Такая ситуация возможна в двух случаях — когда перемагничивается немагнитный материал (например, воздух) или ферромагнетик перемагничен до величины коэрцитивной силы по намагниченности  $H_{cm}$ . Измерение при перемагничивании ферромагнитного образца производится при наличии зазора  $g$  между образцом и полюсами намагничивающего устройства. Измеряется касательная к поверхности образца компонента магнитного поля в центре между полюсами намагничивающего устройства вблизи поверхности образца  $H_g(J)$  в следующей последовательности. В намагничивающей катушке задается ток, величина которого обеспечивает перемагничивание измеряемой области образца по предельной петле гистерезиса. Затем ток уменьшается до нуля, далее меняет знак. Строится зависимость поля на датчике от тока в катушке  $H_g(J)$ . На границе образца касательная компонента магнитного поля непрерывна, поэтому при намагничивании параллельно поверхности поле на датчике фиксирует внутреннее поле в образце.

Фиксируется точка пересечения зависимостей  $H_0(J)$  и  $H_g(J)$ , полученных при измерении поля без образца и с образцом. В точке пересечения поле на датчике при наличии образца равно полю при отсутствии образца (рис. 2). Это означает, что область образца, которая создает поле на датчике, имеет нулевую намагниченность:  $M = 0$ . Следовательно, измеряемое поле равно коэрцитивной силе по намагниченности  $H_{cm}$ .

Для проверки предлагаемой схемы было проведено численное моделирование и экспериментальная проверка на рабочем макете прибора.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ

Расчет был проведен по программе FEMM 4.1 в двумерной модели для намагничивания параллельно поверхности. Магнитные свойства исследуемого материала задавались кривой перемагничивания и коэрцитивной силой  $H_c$ . При намагничивании параллельно поверхности можно считать, что возникающая за счет  $H_c$  ось анизотропии лежит в плоскости образца. Рассчитывалась тангенциальная компонента магнитного поля в центре между полюсами электромагнита на линии расположения датчика (см. рис. 1) как функция тока в катушке электромагнита  $H_g(J)$ .

На рис. 2 приведены результаты расчета при намагничивании параллельно поверхности для  $H_c = 15,9$  А/см и  $H_c = 32,8$  А/м при толщине образца 4 мм и зазоре между образцом и намагничивающим устройством, равным  $g = 0,25; 0,5; 1$  и  $1,5$  мм. При расчете использованы размеры

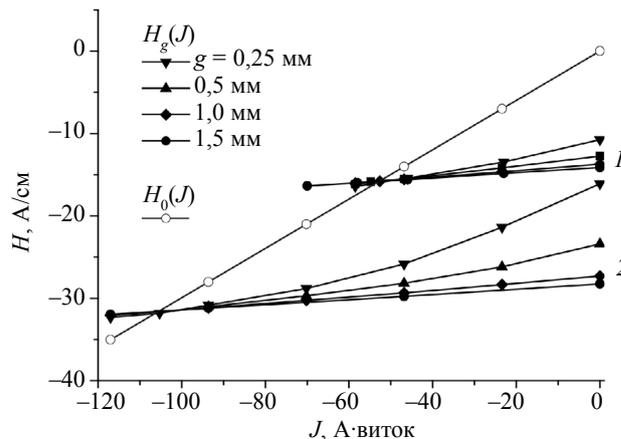


Рис. 2. Численное моделирование измерения  $H_c$  при различных зазорах для образцов с  $H_c = 15,9$  А/см (1) и  $H_c = 31,8$  А/см (2).

экспериментального намагничивающего устройства: толщина магнитопровода  $L_m = 16$  мм, размер магнитопровода вдоль листа  $L_p = 64$  мм, расстояние между полюсами магнитопровода 32 мм.

Расчет показывает, что при всех  $g > 0$  кривые зависимостей  $H_g(J)$  пересекают прямую  $H_0(J)$  в точках, близких к значению заданной коэрцитивной силы образца. Отклонение составляет не более 1-1,5 А/см. То есть модель показывает возможность определения коэрцитивной силы предлагаемым методом при зазоре между образцом и намагничивающим устройством.

Как видно из рис. 2, при увеличении зазора  $g$  увеличивается угол между  $H_0(J)$  и  $H_g(J)$ , но положение точки их пересечения, которая определяет величину  $H_c$ , практически не меняется, то есть определяемая величина  $H_c$  не зависит от зазора. Таким образом, предлагаемый вариант измерений позволяет отстроиться от влияния величины зазора  $\delta$  между магнитопроводом и образцом на определяемую величину  $H_{cm}$ . При этом, как показывает расчет, точка пересечения зависимостей  $H_0(J)$  и  $H_g(J)$  более четко фиксируется при увеличении зазора между образцом и полюсными наконечниками, поскольку в этом случае увеличивается угол между  $H_0(J)$  и  $H_g(J)$  из-за роста размагничивающего поля в измеряемом образце, которое и фиксируется датчиком.

Однако следует учитывать, что при увеличении зазора труднее намагничивать исследуемый образец, поэтому максимальный зазор зависит от размеров намагничивающего устройства и параметров намагничивающей катушки.

Для проверки возможности намагничивания образца по предельной петле гистерезиса устройством с П-образным магнитопроводом был проведен расчет зависимости индукции и внутреннего поля в образце от плотности тока в намагничивающей катушке. Результаты показывают, что при выбранных размерах намагничивающего устройства (см. рис. 1) в образце толщиной 10 мм при зазоре  $g = 2$  мм и плотности тока 6 А/мм<sup>2</sup> (сечение катушек 20×14 мм) в образце создается внутреннее поле  $H = 200$  А/см и индукция  $B = 1,9$  Тл.

Поле, создаваемое намагничивающим устройством, может быть существенно увеличено за счет увеличения высоты намагничивающего устройства и сечения катушек. Например, если увеличить высоту катушки всего на 10 мм, то при плотности тока 6 А/мм<sup>2</sup> можно обеспечить поле в образце 300 А/см при зазоре  $g = 3$  мм. Таким образом, рассматриваемый тип намагничивающего устройства может обеспечить перемагничивание по предельной петле гистерезиса при зазорах 1—3 мм и более при приемлемой плотности тока и размерах катушки.

Отметим еще одну интересную особенность полученных результатов. Видно, что с ростом зазора уменьшается наклон прямых, описывающих зависимость магнитного поля  $H_g(J)$  (см. рис. 2). Уменьшается также и разность между полем в точке пересечения прямых  $H_0(J)$  и  $H_g(J)$  и полем при нулевом токе в катушке намагничивающего устройства  $H_g(0)$ . Причем при  $g > 1$  мм с увеличением зазора величина  $H_g(0)$  практически не изменяется. Отсюда следует практически полезный вывод: для измерения  $H_{cm}$  достаточно измерить только поле  $H_g(0)$ . При этом результаты измерения будут занижены. Эта погрешность является систематической и ее можно учесть в виде коэффициента  $K$ , вводимого в измеряемую величину  $H_{cm} = K \times H_g(0)$  при калибровке прибора. В рассчитанной модели этот коэффициент  $K = 1,17$ .

## СРАВНЕНИЕ С ЭКСПЕРИМЕНТОМ

Для экспериментальной проверки результатов численного моделирования был использован электромагнит, показанный на рис. 1. Поскольку при численном моделировании рассматривалась двумерная модель намагничивающего устройства, то результаты расчетов будут совпадать с экспериментом только качественно.

Размеры экспериментального намагничивающего устройства: толщина магнитопровода  $L_m = 16$  мм, размер магнитопровода вдоль листа  $L_p = 64$  мм, расстояние между полюсами магнитопровода 32 мм, ширина полюсов 32 мм. Сердечник магнитопровода был набран из трансформаторной стали толщиной 0,35 мм для снижения влияния скин-эффекта при проведении измерений в динамическом режиме. На рис. 3 приведены результаты экспериментального определения коэрцитивной силы для двух образцов с известными  $H_c$  и с разными сечениями образцов. Образец № 1: размером 70×36×9 мм,  $H_c = 33,6$  А/см и образец № 2: 88×39×7 мм,  $H_c = 42,9$  А/см.

Результаты экспериментов показывают, что коэрцитивная сила хорошо определяется независимо от сечения образца и от величины зазора.

Измерения проводились для двух зазоров между полюсами и поверхностью образца — 1 и 1,5 мм. Увеличение зазора более 1 мм практически не влияет на результаты измерений.

При зазорах более 1 мм остается постоянной и величина  $H_g(0)$ . Как и при численном моделировании, из экспериментов следует практически полезный вывод: для измерения  $H_{cm}$  достаточно

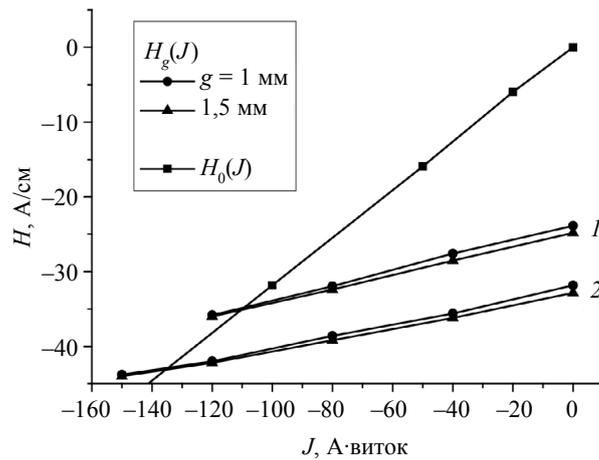


Рис. 3. Экспериментальное определение коэрцитивной силы на образцах с различной величиной  $H_g$ :  
1 — образец № 1; 2 — образец № 2.

измерить только поле  $H_g(0)$ . Повторимся, что погрешность между  $H_{cm}$  и  $H_g(0)$  является систематической и ее можно учесть в виде коэффициента  $K$ , вводимого в измеряемую величину  $H_{cm}$  при калибровке прибора. Для приведенного экспериментального намагничивающего устройства этот коэффициент  $K = 1,4$  ( $H_{cm} = K \cdot H_g(0)$ ).

#### ИЗМЕРЕНИЕ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

Предлагаемый метод позволяет реализовать быструю процедуру измерения  $H_{cm}$ . Для этого достаточно измерять значение поля  $H_g(0)$  в импульсном режиме. Исследуемый образец намагничивается коротким импульсом до технического насыщения, после чего измеряется остаточное тангенциальное поле на поверхности намагниченного участка образца.

На рис. 4 приведены (для примера) диаграммы намагничивающего тока и магнитного поля при работе коэрцитиметра в динамическом режиме. Перемагничивание образца происходит разнопо-

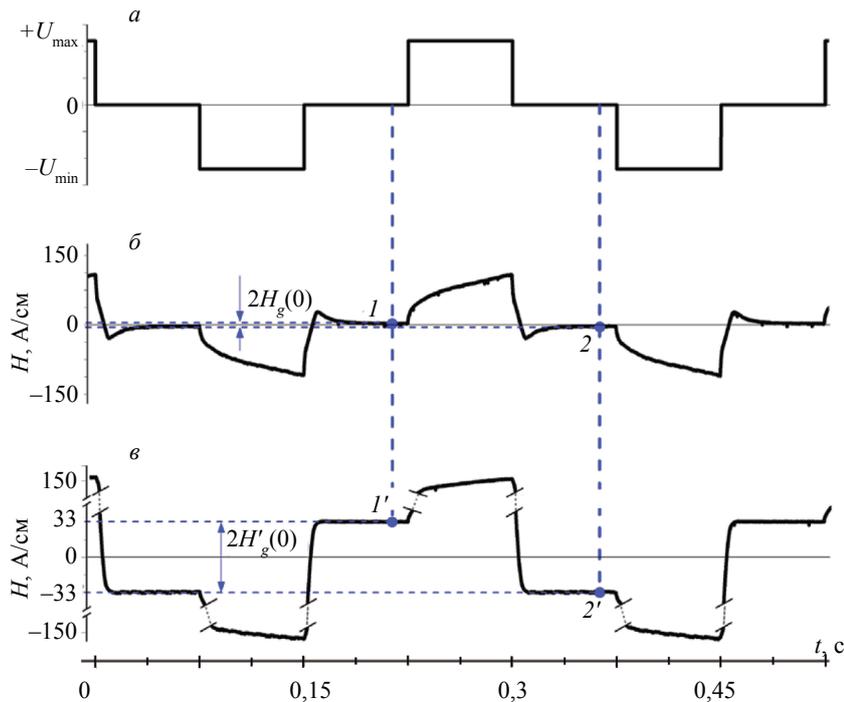


Рис. 4. Осциллограммы динамического перемагничивания:  
 $a$  — осциллограмма задающего напряжения;  $b$  — осциллограмма поля на поверхности образца с  $H_c = 3$  А/см;  $c$  — осциллограмма поля на поверхности образца с  $H_c = 33$  А/см.

лярными импульсами с частотой 3 Гц. Коэрцитивная сила определяется величиной магнитного поля перед началом очередного импульса тока. Для увеличения точности измерения задается серия разнополярных импульсов, а величина коэрцитивной силы определяется как полусумма модулей поля после положительного и после отрицательного импульсов тока.

На рис. 4 приведены осциллограммы динамического перемагничивания двух образцов с коэрцитивной силой 3 и 33 А/см соответственно. Согласно описанному способу, для определения коэрцитивной силы образца  $H_c$  в динамическом режиме необходимо вычислить разность измеренной напряженности магнитного поля в точках 1 и 2, для  $H'_c$  — в точках 1' и 2'. Коэрцитивная сила равна половине вычисленной разности.

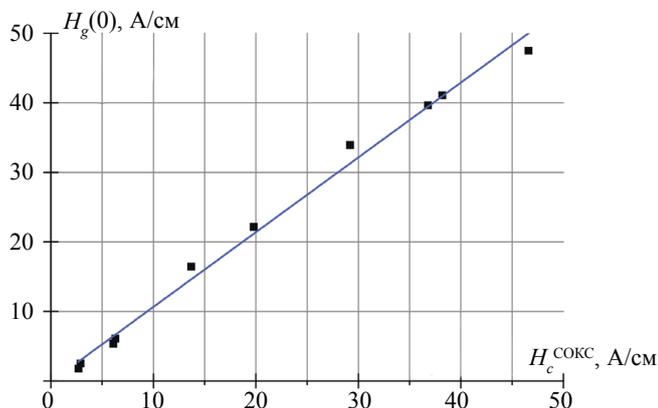


Рис. 5. Результаты измерения  $H_g(0)$  на стандартных образцах коэрцитивной силы.

На рис. 5 приведены результаты измерения коэрцитивной силы стандартных образцов (СОКСов) динамическим методом. Коэрцитивная сила определялась по осциллограмме при перемагничивании разнополярными импульсами с частотой 3 Гц. Результаты измерений с хорошей точностью совпадают с табличными значениями коэрцитивной силы стандартных образцов — во всем диапазоне измерений погрешность не превышает  $\pm 2$  А/см.

## ВЫВОДЫ

Предложен бесконтактный метод измерения коэрцитивной силы с помощью П-образного электромагнита и датчика Холла, измеряющего тангенциальное поле на поверхности исследуемого образца. Метод реализуется с учетом двух типов зазоров между приставным устройством и исследуемым объектом: постоянного, известного и изначально заданного зазора 0,5—1 мм (минимально допустимый зазор) и возможного дополнительного зазора 1—3 мм (максимально допустимый зазор).

Методом численного моделирования и экспериментально продемонстрированы возможности предлагаемого метода измерения коэрцитивной силы.

Показано, что наличие зазора более 1 мм между образцом и полюсами электромагнита при условии, что образец намагничивается до технического насыщения, не влияет на результаты измерения коэрцитивной силы предлагаемым методом.

Предложен способ измерения коэрцитивной силы в динамическом режиме при импульсном перемагничивании разнополярными импульсами с частотой в 3 Гц.

Работа выполнена в соответствии с темой «Диагностика» Г.р. № АААА-А18-118020690196-3 и темой «Магнит» Г.р. № АААА-А18-118020290129-5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с.
2. Бида Г.В. Неразрушающий контроль механических свойств стального проката (обзор). I. Контроль прочностных и пластических свойств // Дефектоскопия. 2005. № 5. С. 39—53.
3. Кузнецов И.А. Магнитный структурный анализ. Свердловск: УрГУ, 1984. 119 с.
4. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Контроль механических свойств листового проката сталей в потоке производства / В кн. Физические свойства металлов и проблемы неразрушающего контроля. Минск: Наука и техника, 1978. С. 57—75.

5. Ульянов А.И., Горкунов Э.С. Магнитная структуроскопия порошковых сталей (обзор) // Дефектоскопия. 1995. № 1. С. 3—69.
6. Сандомирский С.Г. Магнитный контроль физико-механических свойств изделий массового производства в движении (обзор) // Дефектоскопия. 1996. № 7. С. 25—45.
7. Матюк В.Ф. Состояние и перспективы импульсного магнитного метода неразрушающего контроля / В кн. Импульсный магнитный метод неразрушающего контроля. Состояние и перспективы. Сб. трудов конференций, посвященной 30-летию лаборатории магнитных методов контроля / Под ред. В.Ф. Матюка. Минск, 2001. С. 11—33.
8. Матюк В.В., Гончаренко С.А., Хартман Х., Райхельт Х. Современное состояние неразрушающего контроля механических свойств и штампуемости листового проката сталей в технологическом потоке производства // Дефектоскопия. 2003. № 5. С. 19—60.
9. Горкунов Э.С., Загайнов А. И. Магнитные методы и приборы контроля качества изделий порошковой металлургии. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 204 с.
10. Сандомирский С.Г. Применение полного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) // Дефектоскопия. 2006. № 9. С. 36—56.
11. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Связь магнитных свойств со структурным состоянием вещества — физическая основа магнитного структурного анализа (обзор) // Дефектоскопия. 1981. № 8. С. 5—21.
12. Захаров В.А., Горкунов Э.С. Коэрцитиметры с приставными магнитными устройствами // Дефектоскопия. 1995. № 8. С. 69—88.
13. Горкунов Э.С., Табачник В.П. Изучение эффективности расположения датчиков Холла в приставном магнитном устройстве, используемом для регистрации коэрцитивной силы локального участка изделия // Дефектоскопия. 2008. № 6. С. 3—8.
14. Ничипурук А.П., Сташков А.Н., Костин В.Н., Муриков С.А., Муриков Е.С. Коэрцитиметрический контроль качества стальных деталей. Уральская школа коэрцитиметрии // В мире неразрушающего контроля. 2015. Т. 18. № 4. С. 9—13.
15. Бида Г.В. Влияние зазора между полюсами приставного электромагнита и контролируемой деталью на показания коэрцитиметра и способы его уменьшения // Дефектоскопия. 2010. № 11. С. 62—81.
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. No. 9. 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. Ничипурук А.П., Бида Г.В., Царькова Т.П., Гобов Ю.Л., Сташков А.Н., Поволоцкая А.М. О снижении влияния зазора на результаты коэрцитиметрии при учете свойств приставного преобразователя // Дефектоскопия. 2010. № 8. С. 45—53.
18. Матюк В.Ф., Осипов А.Л., Делендик М.Н., Хартманн Х., Райхельт Х. Исследование возможности использования дополнительных параметров при импульсном магнитном контроле листового проката сталей в технологическом потоке производства // Дефектоскопия. 2004. № 1. С. 17—28.
19. Gobov Yu.L., Zhakov S.V., Mikhailov A.V. Measuring coercive force in local domains of a sample // Russian Journal of Nondestructive testing. 2017. V. 53. No. 11. P. 779—784. [Гобов Ю.Л., Жаков С.В., Михайлов А.В. Измерение коэрцитивной силы в локальной области образца // Дефектоскопия. 2017. № 11. С. 27—32.]