

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ *Measurement assurance of pulsed magnetic analyzers*

Матюк В.Ф.
Matyuk V.F.

Изложены принципы метрологического обеспечения приборов импульсного магнитного контроля структурного состояния изделий из ферромагнитных сталей. Рассмотрены конструктивные особенности и возможности мер для поверки импульсных магнитных анализаторов типа ИМА разных модификаций. Показано, что повышение точности приборов данного типа сдерживается отсутствием средств поверки соответствующей точности.

The principles of measurement assurance of pulsed magnetic testing instruments for the structural state of ferromagnetic steels are given. The design features and capabilities of standards for calibration of various modification-sof IMA type pulsed magnetic analyzers are discussed. It is shown that increasing the accuracy of the this type instruments is constrained by the lack of calibration means with appropriate accuracy.

Введение

Для неразрушающего контроля качества изделий из ферромагнитных сталей, подвергаемых для получения требуемых механических свойств соответствующей термической обработке, успешно применяются магнитные методы [1, 2]. Методика контроля изделий этими методами определена ГОСТ 30415-96 [3], действующим на территории стран СНГ.

Особенностью магнитных методов контроля является существенная зависимость их результатов от влияния ряда факторов (геометрия изделия, состояние его поверхности, разброс химического состава), мешающих измерению контролируемого параметра, что накладывает определенные ограничения на метрологическое обеспечение соответствующих приборов.

Среди методов магнитной структуроскопии наибольшее распространение на практике получили метод коэрцитиметрии и импульсный магнитный метод [1, 2].

В приборах, реализующих метод коэрцитиметрии (КИФМ, КИПФ-1 и др.), осуществляется локальное намагничивание и перемагничивание испытуемого изделия в замкнутой магнитной цепи с помощью приставного электромагнита с ферромагнитным сердечником, измерение феррозондом магнитного потока в этой цепи при перемагничивании и тока через обмотку электромагнита, который в момент равенства нулю магнитного потока пропорционален коэрцитивной силе изделий. Коэрцитиметры широко используются в машиностроении для контроля качества закалки и низкотемпературного отпуска изделий, а также в металлургии для контроля качества горячекатаных листов, труб, сортового и профильного проката сталей [1, 4].

Импульсный магнитный метод заключается в локальном намагничивании контролируемого изделия неоднородным импульсным магнитным полем накладного соленоида с постоянной или изменяющейся амплитудой в заданном или изменяющихся направлениях и измерении градиентов нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после окончания заданной серии импульсов или всего цикла намагничивания, по величине которых определяют механические свойства [1, 5, 6].

Метод применяется для контроля механических свойств листового и профильного проката, труб и другой продукции металлургического производства из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых, низколегированных и некоторых высоколегированных и жаропрочных сталей, а также для контроля проведенной термообработки стальных изделий на предприятиях машиностроения и авиастроения.

Принципы построения и современная электронная база позволяют обеспечить высокие метрологические характеристики приборов магнитной структуроскопии. Однако аттестовать эти приборы с точностью лучше, чем 5 % весьма проблематично из-за отсутствия средств поверки соответствующей точности.

Ввиду разных информативных параметров и принципов измерения коэрцитиметрами и приборами импульсного магнитного контроля их метрологическое обеспечение существенно отличается.

Определение метрологических характеристик коэрцитиметров проводится по стандартным образцам коэрцитивной силы (комплект СОКС-1), внесенным в Госреестр Российской Федерации за № 2192-89 и аттестуемым Уральским НИИ метрологии, г. Екатеринбург, Россия [7].

Достоинством поверки приборов по стандартным образцам является практически полное соответствие режима поверки условиям

контроля, но только для данных образцов. Существенным ограничением широкого использования поверки магнитных структуроскопов по стандартным образцам является наличие необратимых изменений их свойств во времени и с изменением температуры, а также большое количество необходимых образцов [8].

Кроме того, точность аттестации стандартных образцов по коэрцитивной силе составляет 2,5 % и пока не просматривается технических решений по ее повышению.

В приборах импульсного магнитного контроля (импульсных магнитных анализаторах и структуроскопах типа ИМА, ИЛК и КИМ разных модификаций) процесс намагничивания осуществляется соленоидом без ферромагнитного сердечника, а информативным параметром является градиент нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности. Величина этого информативного параметра зависит не только от контролируемых свойств образца, но и от его размеров, величины зазора между преобразователем и контролируемым изделием, отклонения оси преобразователя от перпендикуляра к плоскости изделия, а также от режима намагничивания (причем нелинейно). В связи с большой номенклатурой изделий, контролируемых импульсными магнитными анализаторами, диапазон измерения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности лежит в пределах от 200 до 10^5 А/м, причем этот градиент изменяется вдоль оси измерения нелинейно (примерно по экспоненциальному закону).

Поэтому изготовить необходимое количество стандартных образцов, воспроизводящих с точностью порядка 1,5–2 % для каждого режима намагничивания величину и распределение вдоль оси измерительного преобразователя градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности невозможно.

Выходом является аттестация приборов импульсного магнитного контроля отдельно по величине амплитуды импульсов магнитного поля и отдельно по градиенту магнитного поля, то есть отказ от использования стандартных образцов.

АТТЕСТАЦИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

При больших уровнях амплитуды намагничивающих импульсов на торце соленоида результаты контроля импульсным магнитным методом очень слабо зависят от ее колебаний, так как материал доводится до состояния технического насыщения. Поэтому аттеста-

цию по амплитуде в диапазоне полей 10^5 – 10^6 А/м можно проводить с помощью импульсных миллитесламетров, например, типа ТП2-2У, погрешность которых в данном диапазоне не превышает 2,7 %.

Но импульсные миллитесламетры обладают довольно низкой точностью в диапазоне 10^3 – 10^4 А/м (от 5,3 до 12,4 %) и их нельзя применять для аттестации амплитуды импульсов магнитного поля в этом диапазоне, так как даже небольшие вариации ее оказывают существенное влияние на результаты намагничивания и особенно перемагничивания контролируемых изделий.

Так как намагничивающие элементы приборов импульсного магнитного контроля не содержат ферромагнитного сердечника, то создаваемое ими магнитное поле будет строго пропорционально величине тока через них. Поэтому соленоид можно аттестовать с требуемой точностью по постоянному полю, в результате чего определяется коэффициент соленоида. Коэффициент соленоида по постоянному току может быть рассчитан аналитически по геометрии соленоида и числу его витков. Затем в рабочем режиме (режиме импульсного намагничивания) осциллографом или импульсным вольтметром измеряется амплитуда импульса напряжения на измерительном шунте, соединенном последовательно с соленоидом. Она будет пропорциональна амплитуде импульса тока через соленоид. По величине измеренной таким образом амплитуды импульса тока и определенному или рассчитанному ранее коэффициенту соленоида определяется амплитуда намагничивающих импульсов. Форму и длительность намагничивающих импульсов оценивают по изменению сигнала, снимаемого с измерительного шунта с помощью осциллографа.

АТТЕСТАЦИЯ ПО ГРАДИЕНТУ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В основу методики метрологической аттестации импульсных магнитных анализаторов по градиенту магнитного поля положен принцип моделирования поля остаточной намагниченности локального участка изделия с помощью специальных источников (мер) магнитного поля. Эти меры создают в своей рабочей области, в которую помещают преобразователь поверяемого прибора, магнитное поле, величина и распределение которого вдоль оси меры соответствуют величине и распределению поля от локально намагниченного участка изделия [9, 10].

В качестве мер для создания однородных магнитных полей в до-

статочно большом объеме используются соленоиды и катушки Гельмгольца, а для создания магнитных полей с постоянным градиентом – градиентные катушки Максвелла [11, 12].

Соленоиды применяются в качестве мер сравнительно сильных полей и представляют собой относительно длинные катушки.

Однослойный соленоид

Напряженность магнитного поля вдоль оси z однослойного соленоида радиусом a и длиной $2b$ с числом витков N , через который протекает ток I , определяется как [13]

$$H_z^{\text{од}} = \frac{IN}{4b} \left[\frac{b+z}{\sqrt{a^2 + (b+z)^2}} + \frac{b-z}{\sqrt{a^2 + (b-z)^2}} \right]. \quad (1)$$

Расчетное значение поля однослойного соленоида характеризуется высокой точностью (погрешность порядка 0,01–0,001 %). Однослойные соленоиды применяются для воспроизведения магнитных полей напряженностью до 10 кА/м.

Поле в центре однослойного соленоида ($z = 0$)

$$H_{0z}^{\text{од}} = \frac{IN}{2\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (2)$$

В случае длинного однослойного соленоида ($2b \gg a$) поле в центре и на торце можно представить соответственно как

$$H_{0z}^{\text{од}} = \frac{IN}{2b}, \quad H_b^{\text{од}} = \frac{IN}{4b}. \quad (3)$$

Степень однородности поля однослойного соленоида можно оценить по выражению

$$\begin{aligned} \delta^{\text{од}} &= 100 \frac{H_{0z}^{\text{од}} - H_z^{\text{од}}}{H_{0z}^{\text{од}}} = \\ &= 100 \left\{ 1 - \left[\frac{\beta_{\text{од}} + \xi_{\text{од}}}{\sqrt{1 + (\beta_{\text{од}} + \xi_{\text{од}})^2}} + \frac{\beta_{\text{од}} - \xi_{\text{од}}}{\sqrt{1 + (\beta_{\text{од}} - \xi_{\text{од}})^2}} \right] \right\}, \% \end{aligned} \quad (4)$$

где $\beta_{од} = b/a$, $\xi_{од} = z/a$.

На рис. 1, а и б представлены величины отклонения от однородности напряженности поля вдоль оси однослойного соленоида при разных значениях относительно длины $\beta_{од}$. Из них видно, что за счет увеличения длины однослойного соленоида можно добиться требуемой однородности поля в заданной области.

Многослойный соленоид

Магнитное поле вдоль оси z многослойного соленоида длиной $2b$, состоящего из N_1 слоев по N_2 витков в каждом слое и имеющего внутренний радиус a_1 и внешний радиус a_2 , через который протекает ток I , равно [14]

$$H_z^{MH} = \frac{IN_1N_2}{4b(a_2 - a_1)} \times \left[(b + z) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b + z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b + z)^2}} + (b - z) \ln \frac{a_2 + \sqrt{a_2^2 + (b - z)^2}}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + (b - z)^2}} \right]. \quad (5)$$

Поле в центре многослойного соленоида ($z = 0$)

$$H_{0z}^{MH} = \frac{IN_1N_2}{2(a_2 - a_1)} \ln \frac{(a_2 + \sqrt{a_2^2 + b^2})}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + b^2}}, \quad (6)$$

а на торце ($z = b$).

$$H_b^{MH} = \frac{IN_1N_2}{2(a_2 - a_1)} \ln \frac{(a_2 + \sqrt{a_2^2 + 4b^2})}{a_1 + \sqrt{a_1^2 + 4b^2}}. \quad (7)$$

В реальном соленоиде из-за наличия изоляции и неидеальной плотности намотки объем проводника меньше объема обмотки соленоида. Поэтому при расчете реального соленоида вводят коэффициент заполнения $\lambda = V_1/V$, где V_1 – объем проводника, V – объем обмотки соленоида.

В многослойных соленоидах можно получить магнитное поле

напряженностью порядка 100кА/м.

Степень однородности поля вдоль оси соленоида можно оценить по выражениям

$$\delta^{\text{MH}} = 100 \frac{H_{0z}^{\text{MH}} - H_z^{\text{MH}}}{H_{0z}} =$$

$$= 100 \left\{ 1 - \frac{(\beta + \xi) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\beta + \xi)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\beta + \xi)^2}} + (\beta - \xi) \ln \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + (\beta - \xi)^2}}{1 + \sqrt{1 + (\beta - \xi)^2}}}{2 \ln \frac{(\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2})}{1 + \sqrt{1 + \beta^2}}} \right\}, \%$$

(8)

где $\alpha = a_2/a_1$, $\beta = b/a_1$, $\xi = z/a_1$.

На рис. 1, в и г представлены величины отклонения от однородности напряженности магнитного поля вдоль оси многослойного соленоида при разных значениях относительных величин внешнего радиуса α и длины β . За счет увеличения длины соленоида можно добиться требуемой однородности магнитного поля в заданной области. Увеличение внешнего радиуса при постоянной длине уменьшает однородность магнитно поля многослойного соленоида.

Кольца Гельмгольца

Кольцами Гельмгольца называется система, состоящая из двух согласно включенных круговых контуров одинакового радиуса a_r с центрами на общей оси, расположенных параллельно друг другу на расстоянии $2h_r$, равном их радиусу [11, 12].

Если поместить начало координат в центре системы двух одинаковых согласно включенных контуров с током, то распределение напряженности поля вдоль оси этой системы может быть представлено как

$$H_z^r = \frac{I a_r^2}{2} \left\{ \frac{1}{[a_r^2 + (h_r + z)^2]^{3/2}} + \frac{1}{[a_r^2 + (h_r - z)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (9)$$

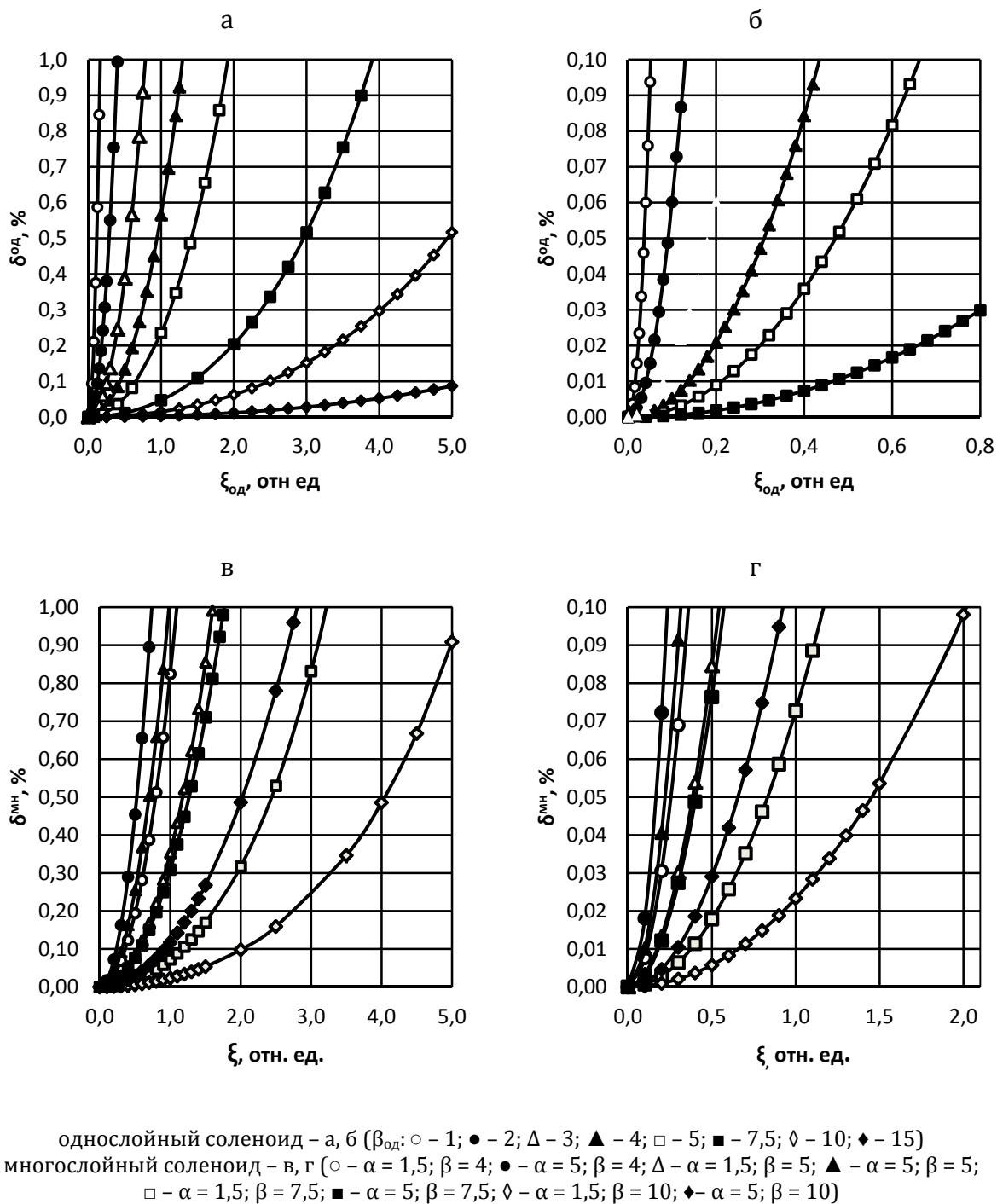


Рис. 1. Отклонение от однородности напряженности поля вдоль оси соленоида

Выражение (9) можно привести к виду

$$H_z^\Gamma = \frac{Ia_\Gamma^2}{2(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^{3/2}} \left\{ \left[1 + \frac{z(z + 2h_\Gamma)}{a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2} \right]^{-3/2} + \left[1 + \frac{z(z - 2h_\Gamma)}{a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2} \right]^{-3/2} \right\}. \quad (10)$$

Применив к выражению (10) формулу биномиального разложения относительно z , получим

$$H_z^\Gamma = \frac{Ia_\Gamma^2}{2(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^{3/2}} \times \left[2 + \frac{15h_\Gamma^2 - 3(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)}{(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^2} z^2 + \frac{15a_\Gamma^4 - 180a_\Gamma^2 h_\Gamma^2 + 120h_\Gamma^4}{4(a_\Gamma^2 + h_\Gamma^2)^4} z^4 - \dots \right]. \quad (11)$$

Если $a_\Gamma = 2h_\Gamma$, то для точек, лежащих на оси z на расстояниях от центра системы, малых по сравнению с расстоянием между контурами, напряженность поля вдоль оси с точностью до членов четвертого порядка малости равна

$$H_z^\Gamma = \frac{8I}{5\sqrt{5}a_\Gamma} \left[1 - 1,152 \left(\frac{z}{a_\Gamma} \right)^4 \right]. \quad (12)$$

Кольца Гельмгольца являются классической системой для создания в некоторой области пространства однородного магнитного поля. Степень однородности вдоль оси z можно определить по выражению

$$\delta^\Gamma = 100 \frac{H_{0z}^\Gamma - H_z^\Gamma}{H_{0z}^\Gamma} = 115,2 \left(\frac{z}{a_\Gamma} \right)^4, \% \quad (13)$$

где H_{0z}^Γ – напряженность магнитного поля в центре системы

$$H_{0z}^\Gamma = \frac{8I}{5\sqrt{5}a_\Gamma}. \quad (14)$$

В табл. 1 приведены данные о распределении напряженности поля вдоль оси колец Гельмгольца.

Таблица 1. Распределение напряженности поля вдоль оси колец Гельмгольца

z/a_r	0	0,025	0,05	0,10	0,15	0,20
H_z^r/H_{0z}^r	1	0,9999996	0,9999993	0,999885	0,999168	0,9981568
$\delta^r, \%$	0	0,000045	0,000720	0,0115520	0,058320	0,1843120
z/a_r	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50
H_z^r/H_{0z}^r	0,995500	0,9906688	0,9827128	0,9705088	0,957608	0,928
δ^r	0,45000	0,933120	1,728720	2,949120	4,723920	7,2

Реальные кольца (или катушки) Гельмгольца состоят из нескольких витков каждое. При этом толщина колец должна быть значительно меньше их среднего радиуса. Для уменьшения влияния размеров обмотки на однородность поля отношение длины кольца $2b_r$ к толщине намотки $\Delta a_r = a_{r2} - a_{r1}$ должно быть [15]

$$\frac{2b}{\Delta a_r} = \sqrt{\frac{31}{36}}, \quad (15)$$

где a_{r1} – внутренний, а a_{r2} – внешний радиусы обмотки.

Градиентные кольца Максвелла

Система, состоящая из двух встречно включенных круговых токов одинакового радиуса a_m , расположенных параллельно друг другу на расстоянии $2h_m = \sqrt{3}a_m$, с центрами на общей оси, называется градиентными кольцами Максвелла. Такая система создает вдоль оси z линейно изменяющееся поле, или поле с постоянным градиентом [12].

Если поместить начало координат в центре системы двух одинаковых и встречно включенных контуров с током, то распределение напряженности поля вдоль оси этой системы может быть представлено как

$$H_z^M = \frac{I a_m^2}{2} \left\{ -\frac{1}{[a_m^2 + (h_m + z)^2]^{3/2}} + \frac{1}{[a_m^2 + (h_m - z)^2]^{3/2}} \right\}. \quad (16)$$

Выражение (16) можно привести к виду

$$H_z^M = \frac{I a_M^2}{2(a_M^2 + h_M^2)^{3/2}} \left\{ - \left[1 + \frac{z(z + 2h_M)}{a_M^2 + h_M^2} \right]^{-3/2} + \left[1 + \frac{z(z - 2h_M)}{a_M^2 + h_M^2} \right]^{-3/2} \right\}. \quad (17)$$

Применив к выражению (17) формулу биномиального разложения относительно z , получим

$$H_z^M = \frac{3I a_M^2 h_M}{(a_M^2 + h_M^2)^{5/2}} \times \left[z - \frac{5(3a_M^2 - 4h_M^2)}{6(a_M^2 + h_M^2)^2} z^3 + \frac{35a_M^4 - 140a_M^2 h_M^2 + 56h_M^4}{8(a_M^2 + h_M^2)^4} z^5 - \dots \right]. \quad (18)$$

Проведя дифференцирование по z , получим

$$\nabla H_z^M = \frac{\partial H_z^M}{\partial z} = \frac{3I a_M^2 h_M}{(a_M^2 + h_M^2)^{5/2}} \times \left[1 - \frac{5(3a_M^2 - 4h_M^2)}{2(a_M^2 + h_M^2)^2} z^2 + \frac{175a_M^4 - 700a_M^2 h_M^2 + 280h_M^4}{8(a_M^2 + h_M^2)^4} z^4 - \dots \right]. \quad (19)$$

Если $2h_M = \sqrt{3}a_M$, то для точек, лежащих на оси z на расстояниях от центра системы, малых по сравнению с расстоянием между контурами, с точностью до членов четвертого порядка малости

$$\nabla H_z^M = \frac{48}{49} \sqrt{\frac{3}{7}} \frac{I}{a_M^2} \left[1 - \frac{880}{343} \left(\frac{z}{a_M} \right)^4 \right]. \quad (20)$$

Градиентные кольца Максвелла являются классической системой для создания в некоторой области пространства магнитного поля с постоянным градиентом. Напряженность поля в центре такой системы равна нулю, а в симметрично расположенных относительно центра точках имеет одинаковую величину, но разную направленность. Степень постоянства градиента напряженности магнитного поля вдоль оси z можно определить по выражению

$$\delta^M = 100 \frac{\nabla H_{0z}^M - \nabla H_z^M}{\nabla H_{0z}^M} = \frac{88000}{343} \left(\frac{z}{a_M}\right)^4, \% \quad (21)$$

где ∇H_{0z}^M – градиент напряженности магнитного поля в центре системы

$$\nabla H_{0z}^M = \frac{48}{49} \sqrt{\frac{3}{7}} \frac{I}{a_M^2}. \quad (22)$$

В табл. 2 приведены данные о распределении градиента напряженности магнитного поля вдоль оси градиентных колец Максвелла.

Таблица 2. Распределение градиента напряженности поля вдоль оси градиентных колец Максвелла

z/a_M	0	0,025	0,05	0,10	0,15	0,20
$\nabla H_z^M / \nabla H_{0z}^M$	1	0,999999	0,999984	0,999743	0,998	0,995895
$\delta^M, \%$	0	0,0001	0,001603	0,0257	0,129883	0,4105
z/a_M	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,50
$\nabla H_z^M / \nabla H_{0z}^M$	0,989987	0,979219	0,9615	0,934321	0,894794	0,83965
$\delta^M, \%$	1,002187	2,9781	3,85	6,5679	10,52055	16,035

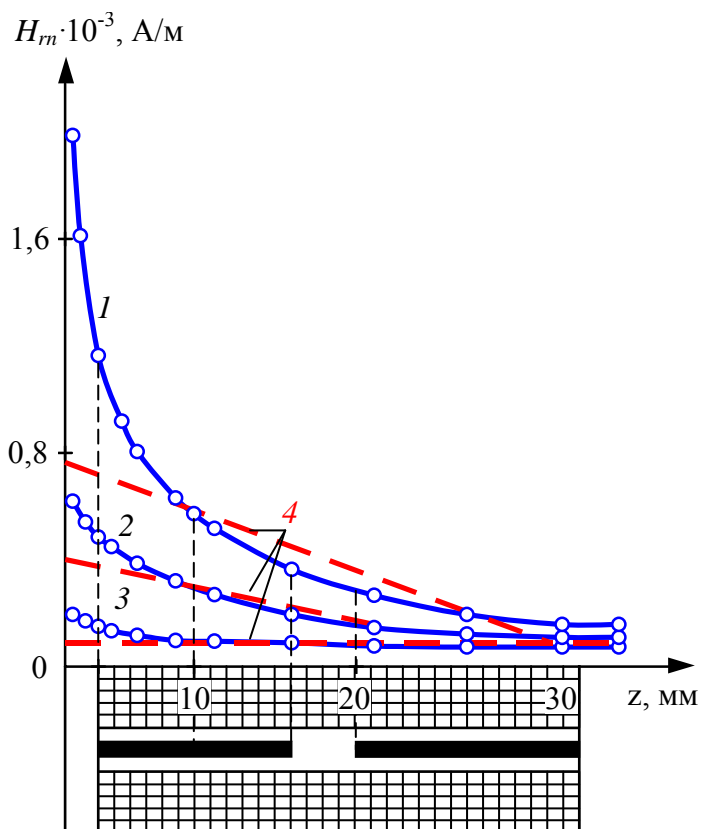
Реальные кольца (или катушки) Максвелла состоят из нескольких витков каждое. При этом толщина колец должна быть значительно меньше их среднего радиуса. Для уменьшения влияния размеров обмотки на однородность поля отношение длины кольца $2b_r$ к толщине намотки $\Delta a_M = a_{M2} - a_{M1}$ должно быть

$$\frac{2b_M}{\Delta a_M} = \sqrt{\frac{37}{44}}, \quad (23)$$

где a_{M1} – внутренний, а a_{M2} – внешний радиусы обмотки.

Меры градиента магнитного поля типа МГП

В основу построения мер для аттестации импульсных магнитных анализаторов положено распределение поля остаточной намагниченности над поверхностью



$T_{отж}$, °C: 1 – 100, 2 – 560, 3 – 800; 4 – поле в мере

Рис. 2. Распределение напряженности поля остаточной намагниченности вдоль оси преобразователя [9]

над поверхностью контролируемого изделия вдоль оси, на которой при контроле располагается магниточувствительный элемент (феррзонд-градиентометр) поверяемого прибора. Такое распределение для трех образцов низкоуглеродистой стали 08ю размером $200 \times 200 \times 1$ мм³, отожженных при температурах 100, 560 и 800 °C соответственно и намагниченных десятью импульсами прибора ИМА-2А, представлено на рис. 2 [9]. Это распределение носит существенно нелинейный характер (близкий к экспоненте). Точное его моделирование является, с одной стороны, весьма сложной, а с другой – нецелесообразной задачей, так как распределение поля зависит от многих факторов, в том числе и от

магнитных свойств материала контролируемого изделия, его размеров и формы. Кроме того, нелинейное распределение магнитного поля трудно аттестовать. Поэтому для аттестации приборов импульсного магнитного контроля по градиенту магнитного поля целесообразно использовать источник, формирующий в области расположения магниточувствительного элемента преобразователя магнитное поле с постоянным градиентом, причем величина этого поля должна быть близкой к величине реального поля, действующего на этот элемент при контроле изделия. Причем рабочая область такой меры должна быть не менее длины магниточувствительного элемента преобразо-

вателя (в случае аттестации приборов типа ИМА – феррозонда длиной 30 мм).

Анализ распределения поля, представленного на рис. 2, показывает, что наиболее близким линейным приближением к реальному распределению поля над поверхностью испытуемого изделия является прямая, которая пересекается с экспериментальной в точке расположения середины полузонда, находящегося в большем поле, и проходит через нуль на границе рабочей области.

В [9] в качестве меры, формирующей в рабочей области поле одной полярности, которое уменьшается по абсолютной величине с постоянным градиентом от одного края рабочей области к другому, предложена система, состоящая из градиентных колец Максвелла и соосного с ними многослойного соленоида (рис. 3, а).

Градиентные кольца Максвелла создают в рабочей области меры магнитное поле с одинаковым вдоль этой области градиентом $\nabla H_M = k_M I_M$, а соленоид – однородное поле $H_C = k_C I_C$, где k_M – постоянная меры по градиенту, k_C – постоянная меры по полю, I_M – ток через градиентные кольца Максвелла, I_C – ток через соленоид.

Для выполнения условия линейного приближения моделируемого мерой магнитного поля к реальному необходимо, чтобы на границе рабочей области (на рис. 3, а вверху) поля, создаваемые градиентными кольцами Максвелла и соленоидом, были равны по абсолютной величине и противоположны по направлению (рис. 3, б).

$$\nabla H_M l = H_C, \quad (24)$$

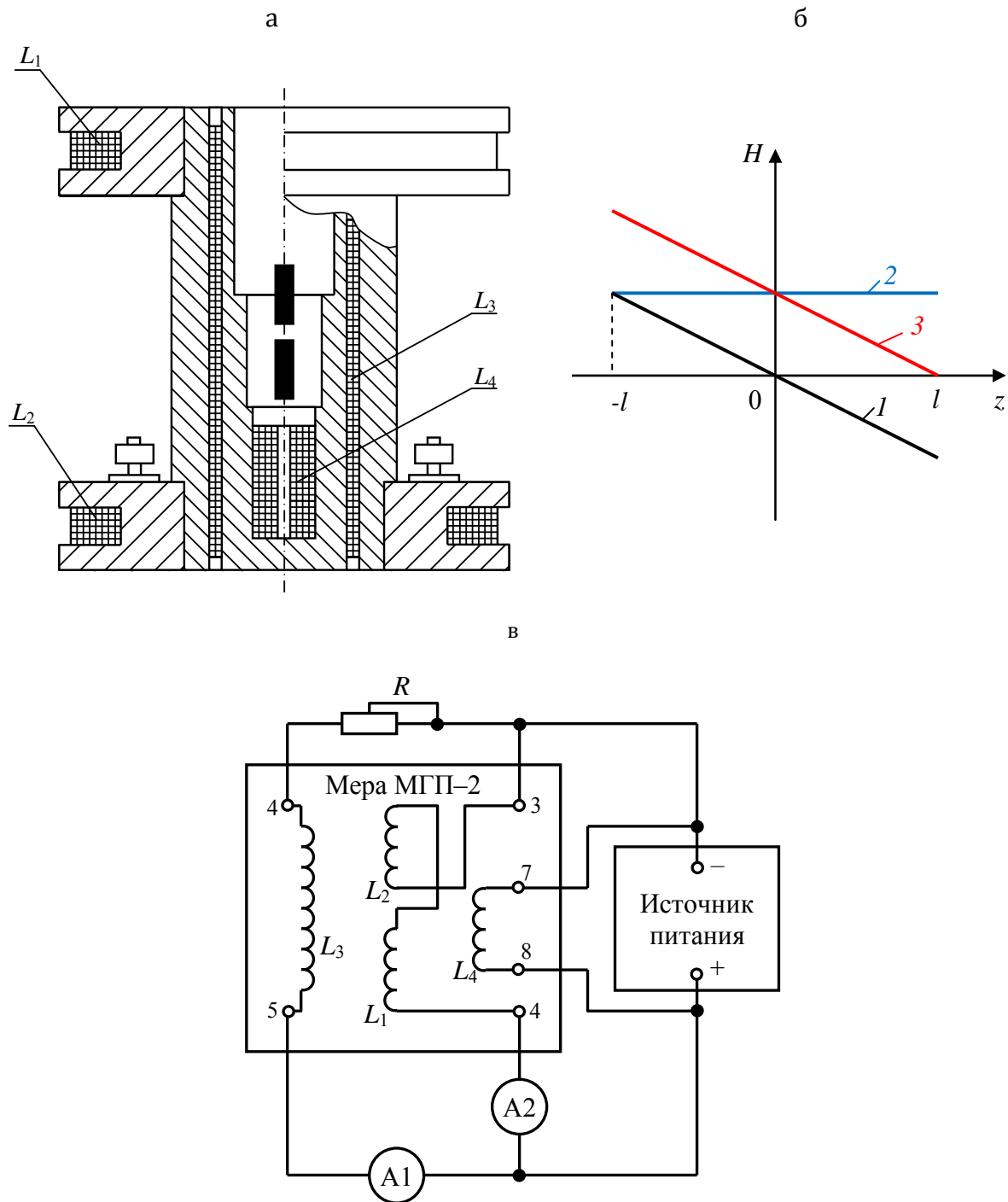
где l – расстояния от центра до границы рабочей области меры.

Отсюда

$$I_C = \frac{k_C}{k_M} I_M l. \quad (25)$$

Выполнение соотношения (25) обеспечивает равенство нулю поля на границе рабочей области меры, то есть работу полуэлементов феррозонда в полях только одного направления. Изменяя величину тока I_M , можно изменять величину градиента, создаваемого мерой магнитного поля. При этом необходимо изменять пропорционально величину тока I_C через соленоид. Так обеспечивается работа феррозонда преобразователя прибора в условиях, близких к его работе при измерении на изделии.

В приборах типа ИМА используется феррозонд длиной 30 мм [5, 6]. Исходя из этого и на основании соотношения $2h_M = \sqrt{3}a_M$ средний радиус кольца выбран 56 мм, а расстояние между кольцами – 96 мм.



а – конструкция меры;
 б – распределение поля: 1 – поле градиентных колец Максвелла, 2 – поле соленоида, 3 – суммарное поле
 в – схема соединения: L_1, L_2 – градиентные кольца Максвелла, L_3 – соленоид, L_4 – дополнительный соленоид, R – резистор, A_1 и A_2 – амперметры

Рис. 3. Мера градиента магнитного поля МГП-2

При числе витков в каждом кольце, равном 320, расчетный коэффициент меры по градиенту магнитного поля равен $6,4 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$.

Схема соединения градиентных колец Максвелла и соленоида между собой и с источником питания представлена на рис. 3, в. При настройке или проверке преобразователь поверяемого средства устанавливается в рабочую область меры. Сначала резистором R устанавливается соотношение токов через градиентные кольца Максвелла и через соленоид L_3 . Затем, регулируя выходное напряжение источника питания, по показаниям амперметра A_2 устанавливают требуемую величину тока в рабочей области.

В мере также предусмотрена возможность регулировки положения феррозонда относительно торца преобразователя по результатам измерения градиента напряженности магнитного поля от дополнительного соленоида L_4 , расположенного соосно с другими элементами меры у нижнего торца рабочей области и представляющего собой копию намагничивающего соленоида преобразователя. Регулировка осуществляется перемещением феррозонда вдоль оси преобразователя перед вклейкой, спиливанием торца преобразователя или подклейкой к нему текстолитового диска нужной толщины.

В зависимости от типов поверяемых приборов импульсного магнитного контроля для их аттестации применяются меры градиента магнитного поля типа МГП разных модификаций (МГП-1, МГП-2, МГП-2А, МГП-5, МГП-5А и МГП-5Б). Меры отличаются размером рабочей области и диапазонами создаваемых ими магнитных полей (мера МГП-1 не имеет соленоида).

Технические характеристики мер типа МГП представлены в табл. 3, а их внешний вид – на рис. 4.

Нижний предел воспроизведения магнитного поля и его градиента определяется уровнем внешних помех. Питание мер типа МГП осуществляется от стандартных источников постоянного тока.

Для аттестации приборов типа ЭЛЛИПС [17] разработана поверочная установка УМОЭ [18], содержащая меру градиента магнитного поля МГПЭ и источник стабилизированного тока ЭБМУ. Ее отличительной особенностью является то, что однородное магнитное поле в ее рабочей области создается не соленоидом, а многослойными кольцами Гельмгольца.

Таблица 3. Технические характеристики мер градиента магнитного поля типа МГП

Тип меры	МГП-1	МГП-2	МГП-2А	МГП-3	МГП-5	МГП-5Б
тип поверяемых приборов	ИМА-2А, ИМА-4, ИЛК-2	ИМА-4, ИМА-4А	ИМА-4А	ТИМА	ИМА-5, ИМА-5А	ИМА-5А, ИМА-5Б, КИМ
диаметр рабочей области, мм	10	25	27	105	55	56
длина рабочей области, мм	30	30	30	40	30	30
диапазон воспроизведения градиента напряженности магнитного поля, А/м ²	0-6,4·10 ⁴	0-6·10 ⁴	0-1,3·10 ⁵	0-10 ⁵	0-10 ⁵	0-2·10 ⁵
диапазон воспроизведения напряженности магнитного поля, А/м	-	0-1,5·10 ³	0-2·10 ³	0-3·10 ³	0-4·10 ³	0-4·10 ³
погрешность определения постоянной меры по градиенту, %	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1
погрешность определения постоянной меры по полю, %	-	1,5	1,5	1,5	1,5	0,5
непостоянство градиента вдоль оси в рабочей области, %	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
неоднородность поля вдоль оси в рабочей области, %	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
масса, кг, не более	1,5	2	4	10	3	7
высота, мм, не более	120	130	140	190	125	160
диаметр, мм, не более	131	131	140	-	132	161
ширина×длина, мм ²	-			300×300	-	
параметры источника тока: диапазон регулировки напряжения, В	15	0-12	0-30	30	15	0-30
ток нагрузки, А	1	1	1	1	1,5	1
стабильность, %	0,05	1	0,5	0,5	0,5	0,5

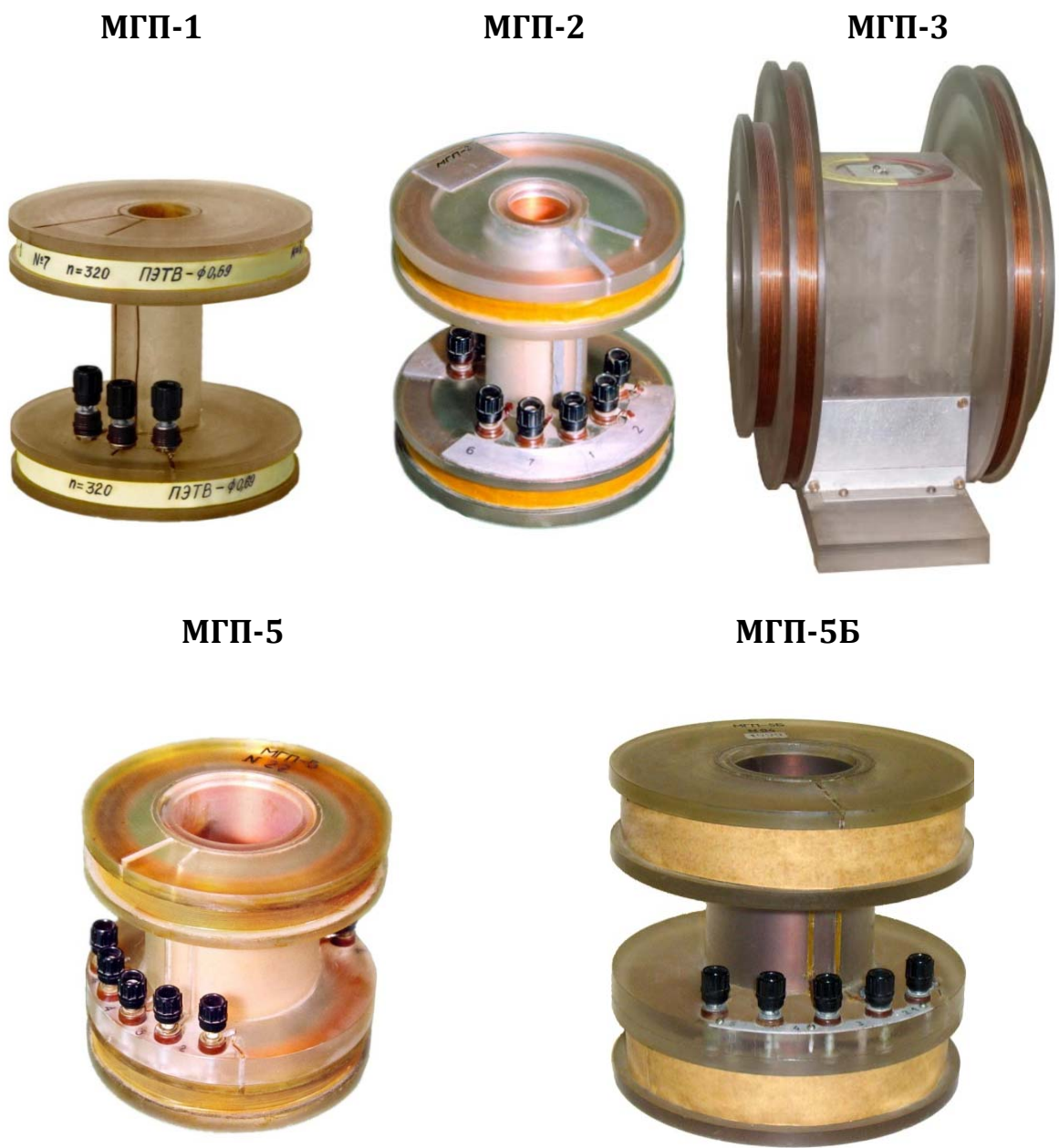


Рис. 4. Меры градиента магнитного поля типа МГП

Диапазон воспроизведения градиента магнитного поля мерой МГПЭ составляет $(0,1-99) \cdot 10^3 \text{ А/м}^2$, а приведенная относительная погрешность не превышает 1,5 %. Неоднородность градиента вдоль оси рабочей области меры МГПЭ на расстоянии до 10 мм от ее центра и погрешность установки заданного тока не более 1,5 % каждая.

Меры типа МГП могут применяться для поверки, настройки и регулировки других типов магнитоизмерительных приборов, исполь-

зующих в качестве магниточувствительного элемента феррозонд или преобразователь Холла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В Институте прикладной физики НАН Беларуси по заданию ГНТП "Стандарты" создан эталон магнитной индукции постоянного поля в диапазоне 0,5 – 2,0 Тл [19], на котором проводятся исследования и проверка приборов, использующих в качестве первичных преобразователей датчики Холла и датчики, работающие на явлении ядерного магнитного резонанса.

Однако разработанные также в Институте прикладной физики меры типа МГП проходят метрологическую аттестацию в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (г. Санкт-Петербург), так как в Республике Беларусь образцовых средств измерений в создаваемом этими мерами диапазоне полей не имеется.

Для аттестации приборов магнитной структуроскопии, использующих в качестве магниточувствительных элементов феррозонды, необходимо создание эталона слабых магнитных полей для передачи единицы магнитной индукции в диапазоне 10^{-4} – $2 \cdot 10^{-2}$ Тл с погрешностью воспроизведения 0,1–0,05 % и единицы градиента магнитной индукции в диапазоне 10^{-3} – $2 \cdot 10^{-1}$ Тл/м с погрешностью воспроизведения 1,0 – 0,5 %. Кроме того, для передачи этих величин соответствующим рабочим мерам необходимы измерители индукции магнитного поля и ее градиента более высокого класса точности.

Среди мер типа МГП в настоящее время наиболее востребована мера МГП-5Б. По результатам метрологической аттестации основная погрешность постоянной по градиенту магнитного поля в центре меры составляет 1 %, а по постоянной магнитной индукции – 0,5 %. Относительные изменения постоянной меры по градиенту не превышают 1 % в сфере диаметром 20 мм и 2 % в сфере диаметром 30 мм. Относительные изменения постоянной меры по магнитной индукции не превышают 0,5 % в сфере диаметром 20 мм и 1,5 % в сфере диаметром 30 мм. Межповерочный интервал меры составляет два года.

Литература

1. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. – Минск: Наука и техника, 1980. – 184 с.
2. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. – М.: Наука, 1993. – 252 с.
3. Неразрушающий контроль механических свойств и микроструктуры металлопродукции магнитным методом: ГОСТ 30415–96. – Введ. 01.01.1998. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1997. – 16 с.
4. Матюк В.Ф., Кулагин В.Н. Контроль структуры, механических свойств и напряженного состояния ферромагнитных изделий методом коэрцитиметрии. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2010, № 3, с. 4–14.
5. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 2, с. 29–64.
6. Матюк В.Ф. Приборы магнитной структуроскопии на основе локального импульсного двухполярного намагничивания. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 4, с. 20–45.
7. Комплект стандартных образцов коэрцитивной силы СОКС-1. – Дефектоскопия, 1991, № 4, с. 96.
8. Испытание магнитных материалов и систем / Е.В. Комаров, А.Д. Покровский, В.Г. Сергеев, А.Я. Шихин; Под. Ред А.Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
9. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д. Метрологическое обеспечение импульсно-локального магнитного метода контроля. – В кн.: Новые физические методы неразрушающего контроля качества продукции. М: МДНТП, 1977, с. 130–135.
10. Matyuk V.F., Piunov V.D. Metrological support of devices for pulse magnetic testing of ferromagnetic articles. – In book: Achievements in Physics of Electromagnetic Nondestructive Testing. Proceedings of the Institute of Applied Physics of Academy of Sciences of Belarus. Minsk-Tokyo, 1994, p. 236–256.
11. Чернышев Е.Т., Чечурина Е.Н., Чернышева Н.Г., Студенцов Н.С. Магнитные измерения. – М.: Издательство стандартов, 1969. – 248 с.
12. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
13. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов. – Екатеринбург: Ур О РАН, 1996. – 266 с.
14. Кифер И.И. Испытания ферромагнитных материалов. М.: Энергия, 1969. – 360 с.
15. McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic field. – Review Scientific Instrumentation. 1936, Vol. 7, No. 3, p. 150–153.

16. McKeehan L.W. Combinations of circular currents for producing uniform magnetic field gradients. – Review Scientific Instrumentation. 1936, Vol. 7, No. 4, p. 178–179.
17. Испытания механических свойств сварных соединений магнитным методом с помощью прибора "Эллипс"/ В.Д. Пиунов, В.Б. Кратиров, В.Ф. Матюк, М.А. Мельгуй, А.А. Осипов, Л.С. Денисов, Е.Н. Орса. – В кн.: Сварка и родственные технологии. Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Минск: БГНПК ПМ и НИКТИ СП с ОП, 1998, с. 93–96.
18. Матюк В.Ф., Пиунов В.Д. Установка УМОЭ для метрологического обеспечения приборов магнитного контроля механических свойств металла в зоне термического влияния сварки. – В кн.: Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии. Материалы международной научно-технич. конф. Часть 2. Могилев, 20–21 апреля 2006 г. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2006, с. 153–154.
19. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Пряхин А.Е. Метрологический комплекс для воспроизведения единицы магнитной индукции постоянного тока. – Весці НАН Беларусі. Сер. фіз-тэхн. навук, 2005, № 2, с. 100–108.

Статья поступила в редакцию 08.08.13