



УДК 620.179.1+537.633.2
ББК 32.86

ХОЛЛОВСКИЙ ДЕФЕКТОСКОП

С.В. Перченко, Д.А. Станкевич

В настоящее время актуальна проблема неразрушающего контроля различных металлических конструкции, а также сварных швов, поскольку от их качества зависит надежность установки или конструкции в целом. Большинство современных методов ограничены в своем применении. Так, для акустических дефектоскопов необходима предварительная обработка поверхности, а также непосредственный контакт, рентгеноскопия неприменима для проверки толстостенных труб, порошковый метод очень дорогостоящ. Для многих магнитных методов необходимо предварительное намагничивание детали, что не всегда возможно. Предлагаемый дефектоскоп свободен от многих недостатков. Принцип его работы основан на изменении нормальной компоненты поля вблизи дефекта. Деталь не нужно предварительно намагничивать, чувствительности прибора достаточно для работы в поле Земли. В качестве датчиков применены преобразователи Холла, которые являются пассивными. Кроме того, прибор обладает малыми габаритами и массой.

Ключевые слова: дефектоскопия, прецизионные измерения, неразрушающий контроль, магнитометрия, датчик Холла, динамическая компенсация погрешностей.

1. Поле дефекта

Наружный дефект

Рассмотрим дефекты в виде прямоугольных щелей с глубиной h и шириной $2b$, ориентированных перпендикулярно намагничивающему полю. Поле прямоугольной щели (см. рис. 1) имеет четко выраженный дипольный характер.

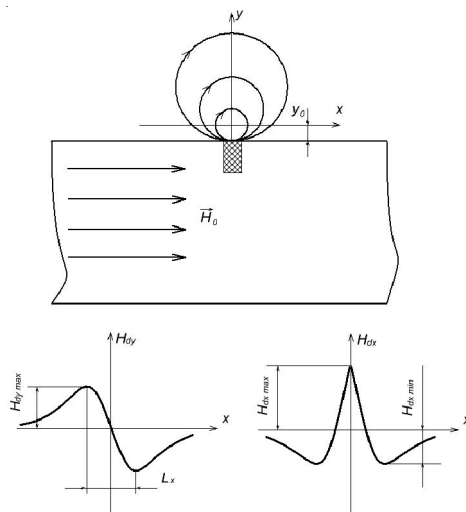


Рис. 1. Топография поля наружного дефекта в виде прямоугольной щели

Напряженность поля дефекта обычно характеризуется величиной центрального максимума тангенциальной составляющей H_d , а топография – расстоянием L_x между экстремумами нормальной составляющей [1]. Значение максимума H_d варьируется в широких пределах, что является следствием различия размеров дефекта, высоты точки наблюдения Y_0 и режима намагничивания.

Поле H_d появляется при очень малой намагниченности и с увеличением H_0 растет. Конкретный вид зависимости $H_d(H_0)$ определяется величиной и формой дефекта, магнитными свойствами материала, параметрами индикатора и его удалением от поверхности.

В пространстве над образцом поле дефекта уменьшается и расширяется: уменьшение максимума поля с увеличением высоты Y_0 происходит примерно по гиперболическому закону, а расстояние L_x в параллельных поверхности металла плоскостях растет линейно. Таким образом, необходимо, чтобы датчик поля находился как можно ближе к поверхности детали.

Внутренние дефекты

Здесь моделью обычно служит перпендикулярное направлению поля H_0 цилиндрическое отверстие диаметром D , ось которого расположена на глубине d_0 под поверхностью образца толщиной t . Поле внутреннего дефекта также носит дипольный характер, однако при достаточно большой глубине залегания d_0 поле по топографии напоминает поле цилиндрического проводника с током, то есть силовые линии над поверхностью образца близки к дугам окружности [1; 9]. Поскольку величина H_d сравнительно медленно меняется в пространстве, ее значение с достаточной точностью определяется на любой высоте. Существенно, что величина и конфигурация поля дефекта слабо связаны, при постоянстве площади поперечного сечения, с формой дефекта.

Увеличение диаметра отверстия при неизменной глубине залегания приводит к квадратичному увеличению поля. В сильных полях границы образца начинают дополнительно усиливать поле дефекта. Напряженность меняется обратно пропорционально квадрату глубины залегания в слабых полях и обратно пропорционально глубине в сильных полях. Поле дефекта, измеряемое над одной из границ пластины, резко возрастает при приближении дефекта не только к границе пластины, около которой производится наблюдение, но и к противоположной [9].

С увеличением расстояния Y_0 точки наблюдения поле внутреннего дефекта спадает, как и для внешнего, примерно по гиперболе, однако убывание здесь идет гораздо медленнее, и тем медленнее, чем глубже лежит дефект.

Р. Янусом показано, что в сильном магнитном поле тело намагничивается практически однородно [10]. На расстояниях, больших линейных размеров дефекта, его поле эквивалентно полю диполя с моментом $P = -IV$, где V – объем дефекта. Поле, создаваемое дефектом, совпадает с полем, которое создает изолированное тело (такой же формы, объема, как и дефект), однородно намагниченное до величины I , но в противоположном направлении. В слабых полях в непосредственной близости от дефекта тело намагничивается неоднородно. Возникает необходимость исследовать микроструктуру магнитного поля материала.

Поле магнитного диполя описывается формулой [3]

$$\vec{B} = \frac{3(\vec{m}\vec{r})}{r^5}\vec{r} - \frac{\vec{m}}{r^3},$$

где m – магнитный момент диполя, соответственно производная поля

$$\frac{\partial B_i}{\partial r_j} = \frac{3}{r^5} \left[m_i r_j + m_j r_i + (\vec{m}\vec{r})(\delta_{ij} - 5 \frac{r_i r_j}{r^2}) \right].$$

В ходе экспериментов было выяснено, что самая выгодная конфигурация расположения датчиков – равнобедренный треугольник. Благодаря тому, что датчики могут быть располо-

жены близко друг относительно друга, появляется возможность исследования микроструктуры поля, что невозможно при использовании, например, феррозондовых датчиков. Изменяя основание треугольника, можно изменять зону покрытия, следовательно, разрешающую способность датчика. В сильном поле магнитный диполь дефекта ориентируется вдоль намагничивающего поля, поэтому можно положить, что $m_z = 0$. Для простоты предположим, что дефект находится в начале координат $x = y = 0$; $r = z$ (см. рис. 2), тогда можем оценить производные поля

$$\begin{cases} \frac{\partial B_z}{\partial x} = \frac{3m_x}{z^4}, \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} = \frac{3m_y}{z^4}. \end{cases}$$

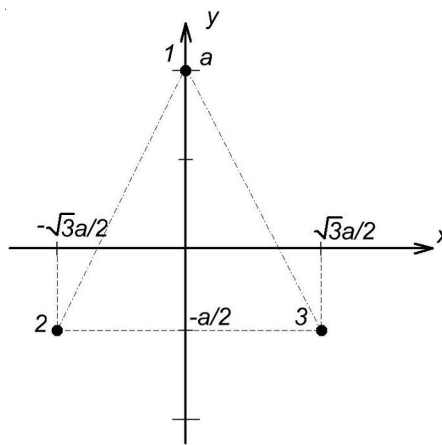


Рис. 2

Мерой дефекта может служить величина

$$\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y}\right)^2 = \frac{9m^2}{z^8}.$$

Разложим поле в точках 1, 2, 3 в ряд Тейлора и ограничимся линейными слагаемыми:

$$\begin{cases} B_1 = B_0 + \frac{\partial B_z}{\partial y} a, \\ B_2 = B_0 + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\partial B_z}{\partial x} a - \frac{1}{2} \frac{\partial B_z}{\partial y} a, \\ B_3 = B_0 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\partial B_z}{\partial x} a - \frac{1}{2} \frac{\partial B_z}{\partial y} a, \end{cases}$$

где B_1, B_2, B_3 – поле в точках 1, 2, 3 соответственно;
 B_0 – поле в начале координат (см. рис. 2). Получим

$$B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 - B_1B_2 - B_1B_3 - B_2B_3 = \frac{9}{4} \left[\left(\frac{\partial B_z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial B_z}{\partial y}\right)^2 \right].$$

Таким образом, измерив поле в трех точках, можно судить о характере дефекта.

2. Описание прибора

Измерительная часть прибора (см. рис. 3) состоит из трех идентичных блоков $K1-K3$. Каждый из блоков содержит: источник тока $ИТ$, предварительный усилитель $У$, систему коммутации $SA1-SA10$ и контроллер $МК1-МК3$ со встроенным АЦП. Система коммутации реализует алгоритм измерения, защищенный патентом РФ [2]. Сигнал с датчика усиливается, оцифровывается и передается основному контроллеру $МК4$, который отправляет данные через оптическую развязку $ОР$ на дальнейшую обработку в персональный компьютер $ПК$. Этот контроллер так же управляет переключением ключей $SA1-SA10$.

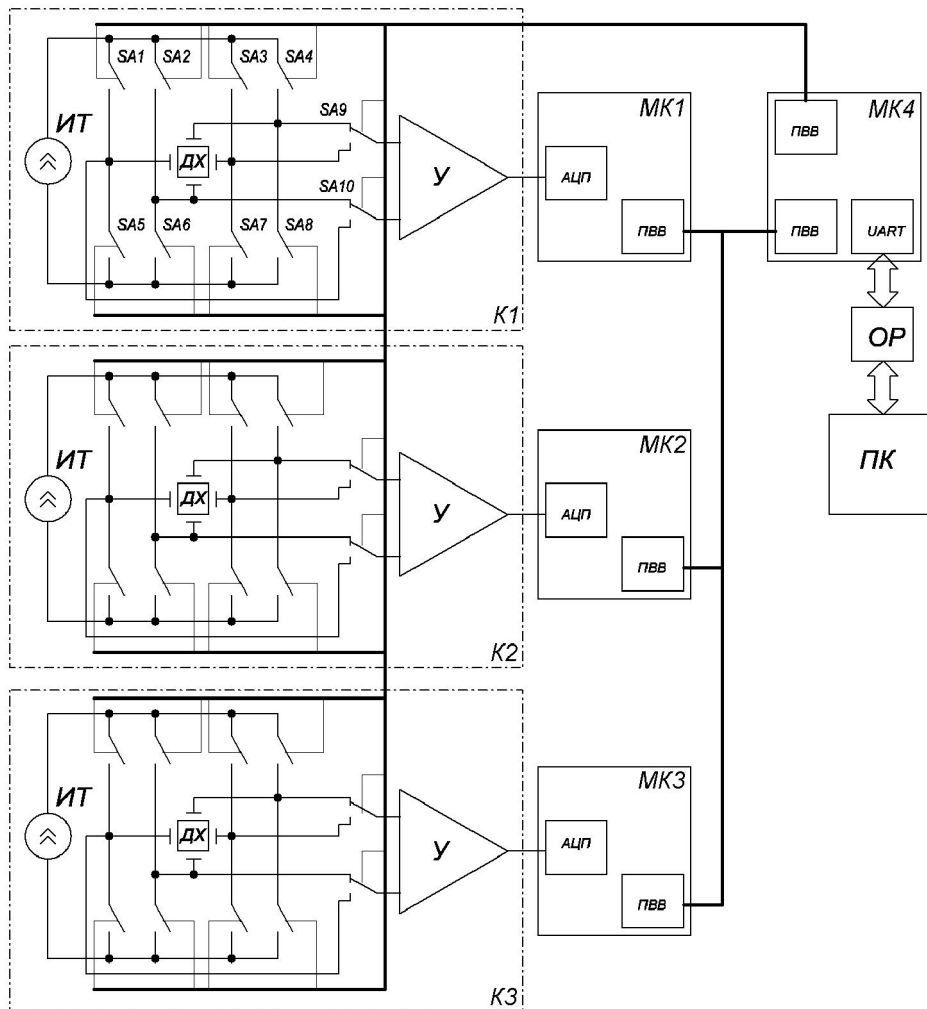


Рис. 3. Структурная схема прибора

Гальваническая оптическая развязка обеспечивает защиту прибора от помех, проникающих по цепи питания компьютера. В данном случае применение трансформаторных развязок недопустимо, поскольку они имеют значительную проходную емкость.

Рассмотрим принципиальную схему прибора (см. рис. 4). Источник тока состоит из источника опорного напряжения $DA4$ и операционного усилителя $DA6$. Ток через датчик задается сопротивлением $R5$. Источник опорного напряжения $ISL21007$ обладает малыми собственными шумами (4 мкВ от пика до пика в полосе частот от 0,1 до 10 Гц) и низким температурным дрейфом (3 ppm/°C) [4]. Операционный усилитель $AD8531$ предназначен для работы на низкоомную нагрузку и способен обеспечить выходной ток до 250 мА [5].

Направление тока через датчик задается ключами VT5-VT8. Они же, в свою очередь, управляются через оптронную развязку DA6-DA9, VT1-VT4.

В качестве потенциальных ключей DA12, DA13 применены аналоговые ключи ISL43L420 [6]. Сопротивление каждого ключа в открытом состоянии составляет порядка 0,25 Ом. Для ключей предусмотрен отдельный стабилизатор напряжения R15-R17, DA11. Потенциальные ключи управляются через отдельную оптопару DA14.

Сигнал с датчика усиливается в 512 раз и через фильтр R29C20 поступает на вход АЦП. Усилитель собран на ОУ DA16, коэффициент усиления задается резисторами R27, R28. ОУ ОРА211 обладает малыми собственными шумами (2 нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 10 Гц) и сравнительно низким температурным дрейфом (0,35 мкВ/ $^{\circ}\text{C}$) [7]. Применение неинвертирующего усилителя исключает погрешность измерения, связанную с наличием КОСС у дифференциальных усилителей. Микросхема DA10 смещает уровень для усилителей и является источником опорного напряжения для АЦП.

Контроллеры соединены между собой четырехпроводной шиной. По ней контроллеры обмениваются между собой данными.

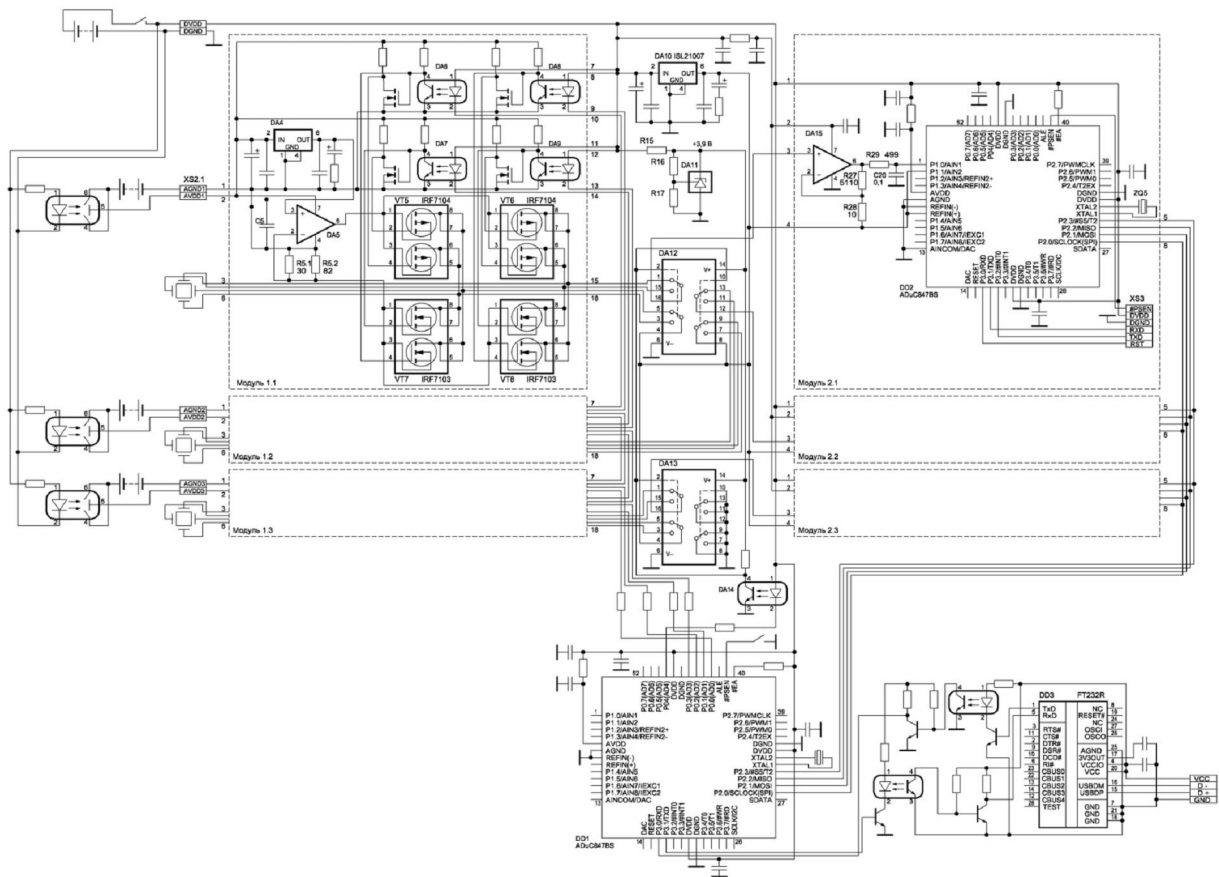


Рис. 4. Принципиальная схема

Питание прибора осуществляется от 4 аккумуляторных батарей. Одна батарея для питания контроллеров, усилителей и ключей, три остальные питают источники тока. Напряжение на источники подается одновременно с включением прибора. Для коммутации питания применены оптореле LCA710 [8].

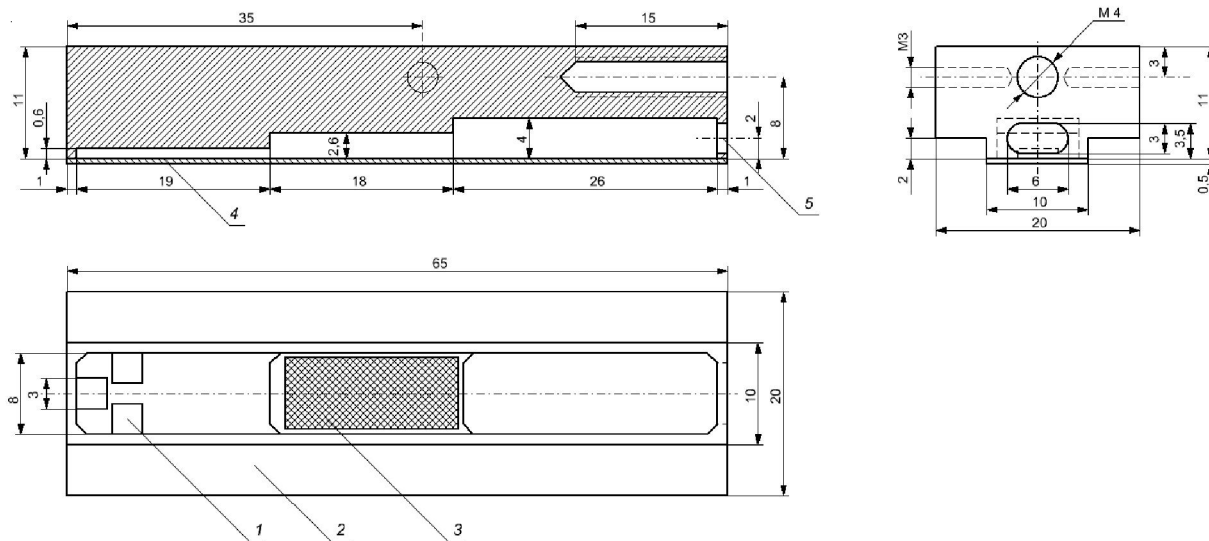


Рис. 5. Чертеж зонда:

1 – датчики; 2 – алюминиевая основа; 3 – переходная плата; 4 – латунная пластина; 5 – отверстие для кабеля

Источники тока, усилители, потенциальные и токовые ключи смонтированы на одной печатной плате, которая помещена в медный экран. Контроллеры, оптореле и оптопары смонтированы на отдельных платах.

Датчики (1) приклеены клеем БФ-6 на алюминиевую основу (2) (см. рис. 5). Клей обеспечивает жесткое крепление, а также хороший тепловой контакт датчика и основы. Клей разбавляют чистым этиловым спиртом в пропорции 1 : 5. Тонкий слой клея наносится на основу и высыхает в течение 20 минут. После наносится второй слой, и приклеиваются датчики. При этом необходимо следить, чтобы клей не попал на эпитаксиальный слой датчика, что может негативно сказаться на его характеристиках.

Проводники датчиков припаивают к переходным платам (3), а к ним припаивается кабель в оплетке и выводится через отверстие (5). Оплетка припаяна к алюминиевой основе. Латунная пластина (4) служит защитой датчиков от механических повреждений, а также является электростатическим экраном.

3. Дефектоскопия образцов

В качестве тестового образца использовалась полоса из горячекатаной стали толщиной 6 мм. В ней было просверлено отверстие диаметром 1,5 мм на глубину 1 мм. Дефектоскопия проводилась с противоположной стороны от отверстия (см. рис. 6). На результирующем графике отчетливо виден дефект. Также был обнаружен, по всей видимости, естественный дефект образца.

Вторым образцом выступал цельнолитой полый цилиндр (внешний диаметр 153 мм, внутренний – 85, высота – 157 мм), предварительно обработанный на токарном станке. Ультразвуковая дефектоскопия показала наличие в детали дефекта. При обследовании заготовки по внешней поверхности холловским дефектоскопом был обнаружен дефект, который оказался трещиной с внутренней поверхности цилиндра. На рисунке 7 приведена фотография дефекта, а также распределение поля по окружности цилиндра.

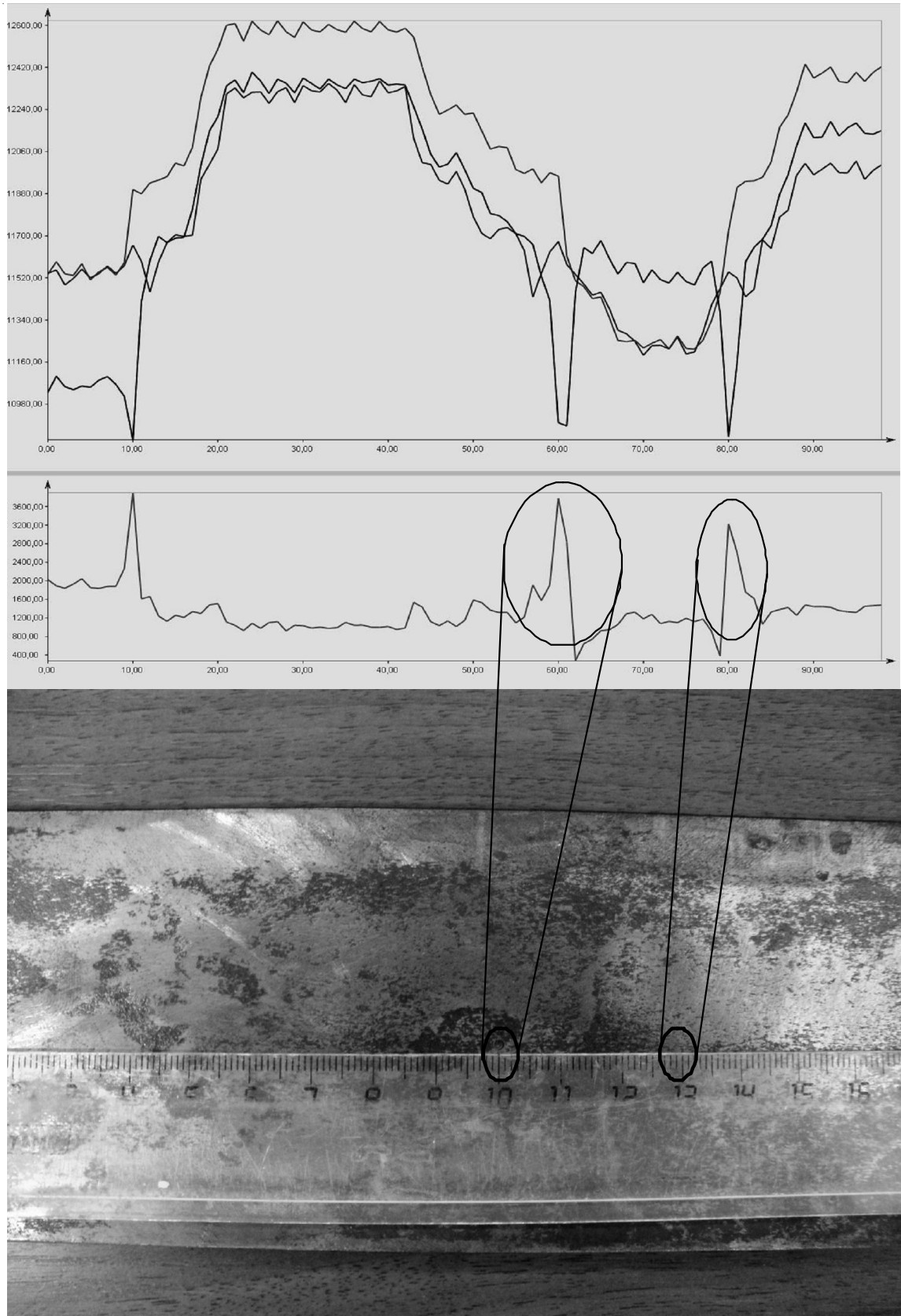


Рис. 6. Магнитодефектограмма образца:
а) искусственный дефект; б) предполагаемый естественный дефект

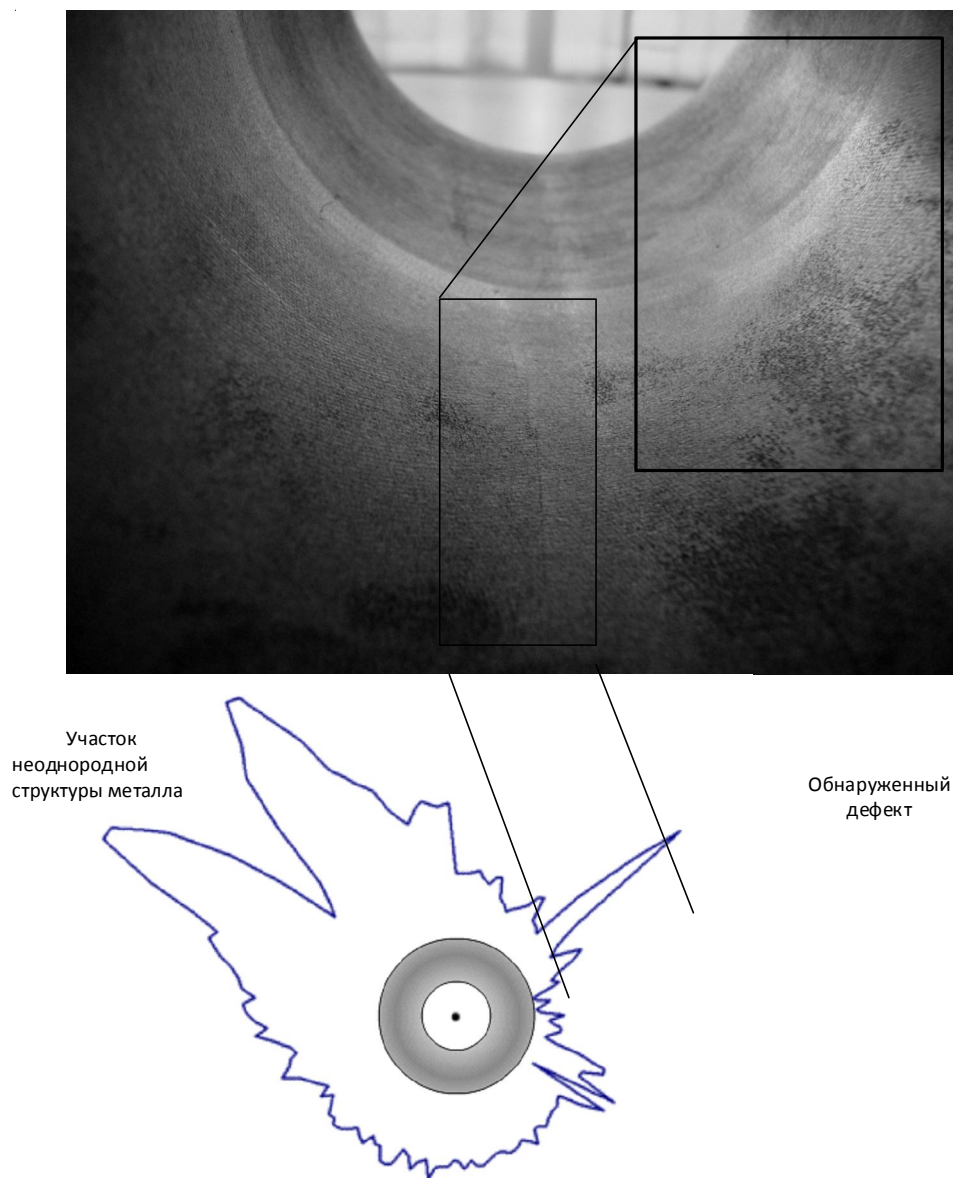


Рис. 7. Магнитодефектограмма полого цилиндра

Заключение

Несмотря на невысокую чувствительность прибора в целом (80 нТл), удалось обнаружить скрытые дефекты в толстостенном образце. Таким образом, была доказана оправданность применения датчиков Холла в дефектоскопе, а также применение метода четырехтактного измерения поля.

Для повышения чувствительности необходимо использовать АЦП с большей разрядностью. Быстродействие прибора также ограничено примененным АЦП.

Габариты прибора в настоящий момент определяет батарея аккумуляторов. Применив трансформаторный преобразователь напряжения, можно существенно снизить габариты и массу при-

бора. Можно даже использовать питание от шины USB, правда в этом случае придется снизить ток через датчики, поскольку по стандарту максимальный ток USB не более 500 мА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлов, С. П. Физические основы магнитографической дефектоскопии / С. П. Михайлов, В. Е. Щербинин. – М. : Наука, 1992. – 240 с.
2. Пат. РФ № 2311655. Способ уменьшения погрешностей холловского магнитометра / В. К. Игнатьев. – 2007. – 5 с.
3. Сивухин, Д. В. Электричество : учеб. пособие / Д. В. Сивухин. – 2-е изд., испр. – М. : Наука, 1983. – 686 с.
4. Техническое описание микросхемы ISL21007. – Режим доступа: www.intersil.com/data/fn/FN6326.pdf.
5. Техническое описание микросхемы AD8531. – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ad8531_8532_8534.pdf.
6. Техническое описание микросхемы ISL43L420. – Режим доступа: www.intersil.com/data/fn/FN6098.pdf.
7. Техническое описание микросхемы ОРА211. – Режим доступа: <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/opa2211a.pdf>.
8. Техническое описание микросхемы LCA710. – Режим доступа: www.datasheetcatalog.org/datasheet/clare/LCA710STR.pdf.
9. Щур, М. Л. / М. Л. Щур, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1977. – № 7. – С. 92–96.
10. Янус, Р. И. Магнитная дефектоскопия / Р. И. Янус. – М. : Гостехиздат, 1946. – 172 с.

HALL-SENSORS DEFECTOSCOPE

S.V. Perchenko, D.A. Stankevich

Now the problem of non-destructive control of various metal designs, and also welded seams as reliability of installation or a design as a whole depends on their quality is actual. The most of modern methods are limited in the application. So, for acoustic defectoscopes is need preparation of a surface and also direct contact, radioscopy it is inapplicable for check of thick-walled pipes, the powder method is very expensive. For many magnetic methods is need pre-magnetisation of a detail that is not always possible. Offered defectoscope it is free from many demerits. The principle of its work is based on change normal components of a field near to defect. The detail does not need to be magnetised preliminary, sensitivity of the device has enough for work in the field of the Earth. Sensors are Hall converters which are passive and do not change a field around itself. Besides, the device have small dimensions and weight.

Key words: *inspection, precision measurement, nondestructive testing, magnetometry, Hall sensor, dynamic offset compensation techniques.*