

УДК 620.179.14

*В. А. Новиков, А. В. Шилов*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ И ДИАМЕТРА НЕСПЛОШНОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЛЕНКИ

UDC 620.179.14

*V. A. Novikov, A. V. Shilov*

## DETERMINATION OF THE DEPTH AND DIAMETER OF DISCONTINUITY IN THE INSPECTION OF FERROMAGNETIC PRODUCTS BY USING MAGNETIC FIELD VISUALIZING FILM

### Аннотация

Разработан способ экспериментального определения диаметра внутреннего дефекта в ферромагнитном объекте с учетом глубины его залегания при использовании для записи полей дефектов визуализирующей магнитные поля пленки. Определены информационные параметры сигнала, обусловленного дефектом, при контроле ферромагнитной пластины в приложенном поле. Построены номограммы, позволяющие найти глубину залегания дефекта и его диаметр.

### Ключевые слова:

магнитный контроль, визуализация магнитного поля, дефекты сплошности, определение глубины залегания и диаметра дефекта, коэффициент отражения света.

### Abstract

The technique is developed for the experimental determination of the diameter of an internal defect in a ferromagnetic product with its depth taken into account, by using magnetic field visualizing film to record fields of defects. Information parameters of a signal due to the defect are defined while inspecting a ferromagnetic plate in the applied field. Nomograms are constructed to determine the depth of the defect and its diameter.

### Key words:

magnetic control, visualization of the magnetic field, defects of continuity, determination of the defect depth and diameter, reflection coefficient.

Для определения диаметра дефектов при магнитографическом контроле применяют испытательные образцы. Они содержат искусственные или естественные дефекты, соответствующие минимальному браковочному уровню, установленному нормативно-технической документацией. Дефекты в испытательных образцах выполняют на внутренней по отношению к магнитной ленте поверхности, т. к. вследствие наибольшей удаленности от нее выявляемость таких дефектов наихудшая. Испытательные образцы используют для

изготовления эталонных магнитных лент. С их помощью дефектоскоп настраивают на предельную чувствительность. Для этого по контрольной магнитограмме на экране импульсной индикации дефектоскопа устанавливают определенный уровень сигнала от дефекта в испытательном образце. Если амплитуда сигнала, обусловленного дефектом в контролируемом изделии, превышает браковочный уровень, то дефект считают недопустимым. Дефекты, находящиеся на меньшей глубине, станут выявляться сигналом большей амплитуды,

т. е. будет происходить перебраковка изделий. Поэтому разработка способа определения диаметра внутреннего дефекта с учетом глубины его залегания является важной и актуальной задачей.

Попытки определения глубины залегания дефекта в контролируемом изделии при магнитном контроле предпринимались и ранее. Так, в [1] указывается возможность определения размера дефекта с отстройкой от координат его расположения при помощи схемы, состоящей из интегрирующей цепочки и магнитоэлектрического измерительного прибора. Однако четкая зависимость между шириной магнитного отпечатка на ленте и глубиной залегания дефекта наблюдается только в поверхностном слое толщиной до 8 мм. Поэтому наличие интегрирующей цепочки и магнитоэлектрического измерительного прибора или частотного анализатора сигнала в магнитографическом дефектоскопе только частично решает поставленную задачу, т. к. толщина стенки контролируемых объектов при магнитографической дефектоскопии составляет от 2 до 25 мм [2].

В [1] для определения диаметра дефекта, независимо от глубины его залегания, предложено использовать двухслойную магнитную ленту, рабочие слои которой разделены диэлектриком заданной толщины. Чтобы найти глубину залегания дефекта, записывают математические выражения для суперпозиции тангенциальных составляющих полей в зоне каждого магнитоактивного слоя ленты. Решая систему этих уравнений, определяют глубину дефекта в зависимости от напряженностей полей, воздействующих на каждый магнитоактивный слой.

Аналогично определяется глубина залегания дефекта, если магнитные ленты располагаются на наружной и внутренней поверхностях пластины.

Чтобы решить поставленную задачу, проанализируем результаты теоретических и экспериментальных иссле-

дований, относящихся к особенностям формирования поля рассеяния внутреннего дефекта, находящегося в намагниченном ферромагнитном объекте.

В [3] выполнен расчет поля внутреннего дефекта цилиндрической формы радиусом  $r$ , продольная ось которого параллельна поверхности полубесконечного тела, для случая, когда дефект расположен на глубине  $h$  от поверхности ферромагнитного объекта с магнитной проницаемостью  $\mu = \text{const}$ , а магнитные проницаемости материала дефекта и окружающей объект среды равны 1. Получены математические выражения для тангенциальной и нормальной составляющих поля дефекта на поверхности полубесконечного тела. Показано, что тангенциальная составляющая поля дефекта на поверхности объекта в плоскости его симметрии, когда  $\mu \gg 1$ ,  $r \ll h$ , прямо пропорциональна напряженности намагничивающего поля  $H_0$ , квадрату радиуса дефекта и обратно пропорциональна квадрату глубины его залегания.

Аналогичные расчеты, но с учетом влияния границ раздела сред произведены в [4–7]. Сравнение топографий тангенциальных составляющих магнитостатических полей одинаковых дефектов, определенных с учетом и без учета влияния границы раздела сред, показывает, что при  $h > 6$  мм результаты расчетов практически совпадают. Влияние границы раздела сред таково, что при приближении дефекта к наружной поверхности изделия (по отношению к преобразователю) рост  $H_{xd}$  и  $H_{yd}$  несколько замедляется, а при приближении дефекта к внутренней поверхности плоскопараллельной пластины замедляется убывание поля дефекта, причем  $H_{xd}$  начинает несколько возрастать. Влияние границ изделия сказывается при расстоянии от дефекта до границы в пределах 2...4 диаметров дефекта. Описанные результаты расчетов тангенциальной и нормальной составляющих полей рассеяния дефектов дают хоро-

шее качественное совпадение с результатами, полученными экспериментально, но не всегда позволяют получить количественное совпадение.

Приведенные далее результаты экспериментальных исследований относятся к случаю протяженных дефектов, расположенных в образцах из низкоуглеродистой стали, намагниченных постоянным приложенным полем. Дефект смоделирован цилиндрическим отверстием, ось которого параллельна наружной поверхности, а внешнее намагничивающее поле направлено перпендикулярно продольной оси дефекта. Установлено, что поле внутреннего дефекта становится заметным только при некотором пороговом значении  $H_0$  тем больше, чем толще покрывающий дефект слой металла [8, 9]. Для несплошностей достаточно большого раскрытия ( $\Delta > 0,2$  мм), какими являются также цилиндрические отверстия, диаметр и конфигурация поля внутреннего дефекта слабо связаны с формой дефекта при постоянстве площади его поперечного сечения. Для несплошностей большого раскрытия зависимость  $H_{dx}(H_0)$  близка к линейной. Если раскрытие дефекта мало ( $\Delta < 0,02$  мм), то форма дефекта влияет на величину его поля рассеяния, а зависимость  $H_{dx}(H_0)$ , как и для наружных дефектов, напоминает основную кривую намагничивания материала образца [10, 11].

Напряженность поля внутреннего дефекта меняется обратно пропорционально квадрату глубины его залегания в слабых полях [5] и глубине залегания в сильных полях [5, 12]. Приближение отверстия к внутренней относительно индикатора поверхности изделия усиливает поле, что нарушает установленную закономерность [5].

При неизменной глубине залегания увеличение диаметра отверстия практически не влияет на расстояние  $l_x$  между экстремальными значениями нормальной составляющей поля дефекта [10, 12], но величина поля растет

пропорционально квадрату его диаметра [11, 12]. Величина  $H_{dxmax}$  зависит от  $H_0$  и соотношения между диаметром отверстия и толщиной образца. В сильных намагничивающих полях, когда для материала контролируемого объекта  $\mu > \mu_{max}$ , при отношении диаметра дефекта к толщине образца  $\frac{d}{S} > 0,1$  гра-

ницы образца начинают дополнительно усиливать поле рассеяния дефекта, в то время как в слабых полях это влияние малозаметно [5]. Расстояние между экстремальными значениями нормальной составляющей поля внутреннего отверстия линейно зависит от глубины его залегания [12, 13].

Предположим, что определить глубину залегания дефекта можно, используя пленку, визуализирующую магнитные поля, т. к. на нее записывается не только тангенциальная, но и нормальная составляющая магнитного поля [14–20]. Это позволит определить расстояние между экстремальными значениями нормальной составляющей поля внутреннего дефекта, которое, как следует из [12], линейно зависит от глубины его залегания. Необходимо отметить, что при намагничивании объекта параллельно его поверхности и использовании для записи полей внутренних дефектов пленки, визуализирующей магнитные поля, на ней наблюдают светлую полосу, обусловленную дефектом, по обе стороны которой расположены две темные полосы. Последние сформированы нормальной составляющей поля рассеяния дефекта, и их ширина может достигать 10...12 мм [14]. Определить на них положение точек, соответствующих экстремальным значениям нормальной составляющей поля дефекта, затруднительно. Для этого целесообразно произвести количественную оценку индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке [15–17].

Образцы для исследований представляли собой пластины размерами

330×40×25 мм из стали Ст3. В них на различной глубине были выполнены сквозные отверстия, параллельные поверхности 330×40 мм. Намагничивание образцов осуществляли электромагнитом с П-образным сердечником, который имел сечение полюса 120×50 мм и обмотку с числом витков провода диаметром 1,45 мм – 450. Экспериментальная установка схематично изображена на рис. 1. Она содержит подключенный к источнику постоянного тока электромагнит 1 с П-образным сердечником, на полюсах которого располагается контролируемый образец 2 с уложенной на его поверхность магнитной пленкой 3, визуализирующей магнитные поля, светодиод 4, его стабилизированный по то-

ку источник питания 5, светофильтр 6 и конденсор 7, помещенные в корпус 8, фотоаппарат 9 и устройство обработки информации 10. Магнитную пленку освещали, применяя оптическую систему, которая позволяла получить на выходе квазипараллельные лучи света 11. Так как наибольшее численное значение интенсивности изображения предварительно восстановленной магнитной пленки наблюдается для составляющей зеленого цвета [15], то в системе освещения был использован зеленый светофильтр ЖЗС-10 с максимальным показателем поглощения  $K_\lambda = 0,01$  на длине волны излучения  $\lambda = 560$  нм.

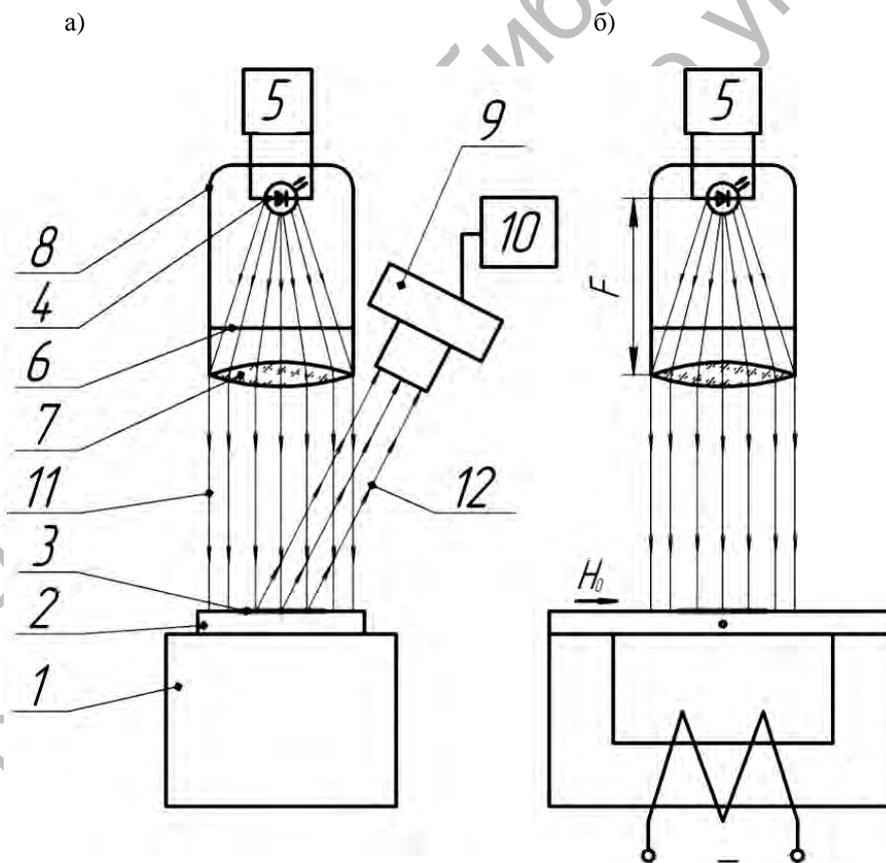


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки: а – вид спереди; б – вид сбоку (фотоаппарат условно не показан): 1 – электромагнит с П-образным сердечником; 2 – контролируемый образец; 3 – пленка, визуализирующая магнитные поля; 4 – источник света; 5 – источник питания; 6 – светофильтр; 7 – конденсор; 8 – корпус оптической системы; 9 – цифровой фотоаппарат; 10 – устройство обработки информации; 11 – падающее световое излучение; 12 – воспринимаемое световое излучение

В процессе намагничивания образца фиксировали изображение на визуализирующей магнитные поля пленке в зоне индикаторных рисунков дефектов с помощью цифрового фотоаппарата «Canon Power Shot SX-100» в ручном режиме при фиксированном уровне чувствительности ISO 800, из которого при помощи разработанной компьютерной программы по пиксельно считывали значения интенсивности окраски, пропорциональные отраженному световому излучению  $k\Phi_r$  от магнитной пленки в зоне дефекта, где  $k$  – коэффициент, учитывающий потери оптического излучения от источника до приемника. Затем аналогично определяли значения, пропорциональные падающему световому излучению  $k\Phi_0$ , от источника света. Чтобы исключить влияние посторонних источников светового излучения на результаты экспериментальных исследований, съемку производили в темном помещении. Предварительно фотоаппарат градуировали при помощи нейтрально-серых фильтров и располагали таким образом, что угол наблюдения составлял  $12^\circ$ , т. к. максимальное приращение коэффициента отражения пленки  $\Delta r_m$  в зоне индикаторных рисунков дефектов, обусловленного дефектом в этом случае, изменяется незначительно [20] (рис. 2). На рис. 2 представлен график зависимости максимального приращения коэффициен-

та отражения пленки  $\Delta r_m$  в зоне индикаторного рисунка дефекта от угла наблюдения  $\alpha$ . Из рисунка видно, что в диапазоне углов наблюдения  $-40 < \alpha < 40^\circ$  изменение  $\Delta r_m$  невелико. Это свидетельствует о том, что происходит регистрация светового потока излучения, полученного в результате его диффузного отражения. Исследования проводили при суперпозиции напряженностей полей, действующих на пленку, до 500 А/см, т. к. при больших полях пленка становится нечувствительной к полям, параллельным ее поверхности [15].

Далее строили графики зависимости коэффициента отражения света  $r = \frac{\Phi_r}{\Phi_0}$  магнитной пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов от расстояния  $x$  от их плоскости симметрии в поперечном направлении. В результате на мониторе компьютера наблюдали обусловленный дефектом ярко выраженный максимум с двумя симметрично расположенными минимумами (рис. 3). Затем измеряли расстояние  $l$  между минимумами этого импульса, строили графики зависимости  $l$  от глубины залегания дефекта  $h_z$  диаметром 2 мм при различных режимах намагничивания (рис. 4).

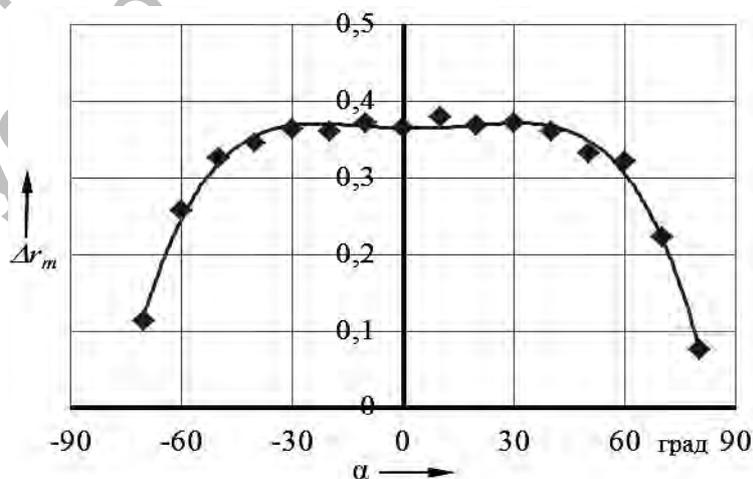


Рис. 2. График зависимости максимального приращения коэффициента отражения пленки  $\Delta r_m$  в зоне индикаторного рисунка дефекта от угла наблюдения

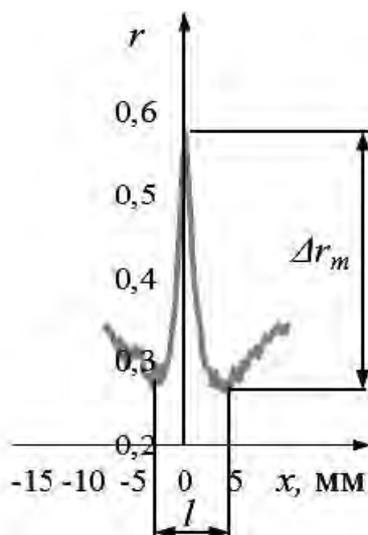


Рис. 3. График зависимости коэффициента отражения света пленки от расстояния  $x$  от плоскости симметрии индикаторных рисунков дефектов в поперечном направлении

Из рис. 4 видно, что при режимах намагничивания  $H > 210$  А/см графики зависимостей  $l(h_z)$  имеют линейный характер, причем при  $H > 275$  А/см прямые практически сливаются в одну линию. Графики показывают, что расстояние  $l$  между минимумами  $r(x)$  увеличивается для дефектов, находящихся на большей глубине, а при глубине залегания дефекта меньше 10 мм значения  $l$  остаются практически одинаковыми для всех режимов намагничивания.

Полученные графики позволяют определить глубину залегания дефекта по измеренному расстоянию между минимумами  $r(x)$ . Таким образом, появилась возможность определять глубину залегания дефекта, находящегося даже на расстоянии 23 мм от поверхности объекта. Это объясняется тем, что на визуализирующую магнитные поля пленку записывается не только тангенциальная, но и нормальная составляющая магнитного поля дефекта, а расстояние между ее экстремальными значениями линейно связано с глубиной залегания дефекта.

По вышеописанной методике контролировали образцы, в которых дефект сплошности в виде отверстия находился

на одинаковой глубине, а диаметр изменялся от 2 до 6 мм с шагом 2 мм. Эксперименты показали, что при неизменной глубине залегания увеличение диаметра отверстия практически не влияет на расстояние  $l$  между минимумами  $r(x)$  (рис. 5). Это косвенно подтверждает установленную в [4] закономерность, заключающуюся в том, что при постоянной глубине залегания отверстия увеличение его диаметра практически не влияет на расстояние между экстремальными значениями нормальной составляющей его поля и дает основание утверждать, что основной вклад в формирование минимумов  $r(x)$  вносит нормальная составляющая поля дефекта.

Чтобы определить диаметр дефекта, находящегося на произвольной глубине в пластине толщиной 25 мм при напряженности поля  $H_0 = 275$  А/см, строили графики зависимостей максимальных приращений коэффициентов отражения пленки  $\Delta r_m$  в зоне индикаторных рисунков дефектов разного диаметра от глубины их залегания  $h_z$  (рис. 6). Из рисунка видно, что при диаметре отверстия 2 мм происходит монотонное уменьшение  $\Delta r_m$  с ростом глубины залегания отверстия в диапазоне

$2,5 \text{ мм} \leq h_3 \leq 22,5 \text{ мм}$ . По мере увеличения диаметра несплошности наблюдается замедление возрастания  $\Delta r_m$  при приближении отверстия к наружной поверхности и замедление убывания, и даже возрастание  $\Delta r_m$ , при приближении к внутренней поверхности пластины. Анализ полученных кривых показывает,

что с увеличением диаметра отверстия появляются области неоднозначного определения диаметра дефекта в пластине толщиной 25 мм: для отверстия диаметром 4 мм – при глубине залегания более 20 мм; для  $d = 5 \text{ мм}$  – при глубине  $h_3$  меньше 7,5 мм и больше 20 мм; при  $d = 6 \text{ мм}$  – до 10 мм.

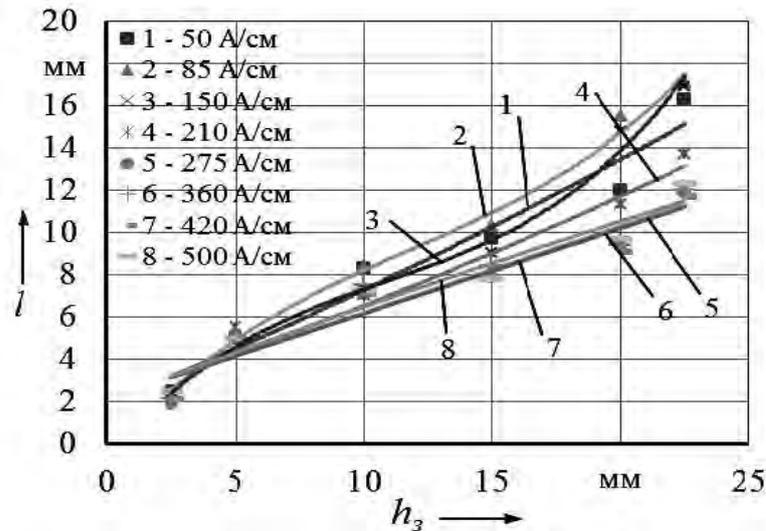


Рис. 4. Зависимость расстояния между минимумами  $l$  сигнала, обусловленного индикаторным рисунком отверстия диаметром 2 мм, от глубины его залегания  $h_3$  в пластине толщиной 25 мм: режимы намагничивания: 1 – 50 А/см; 2 – 85 А/см; 3 – 150 А/см; 4 – 210 А/см; 5 – 275 А/см; 6 – 360 А/см; 7 – 420 А/см; 8 – 500 А/см

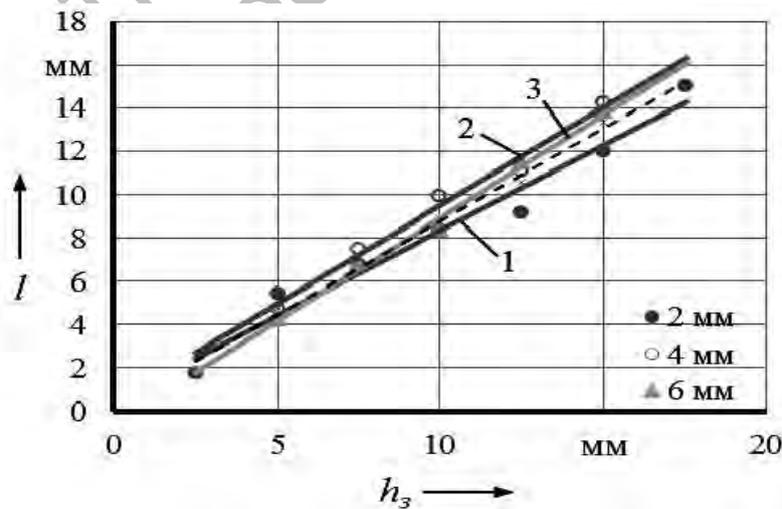


Рис. 5. Зависимость расстояния  $l$  между минимумами  $r(x)$  от глубины залегания  $h_3$  дефекта в пластине толщиной 25 мм: 1 –  $d = 2 \text{ мм}$ ; 2 –  $d = 4 \text{ мм}$ ; 3 –  $d = 6 \text{ мм}$ ; - - - средняя линия; режим намагничивания  $H_0 = 275 \text{ А/см}$

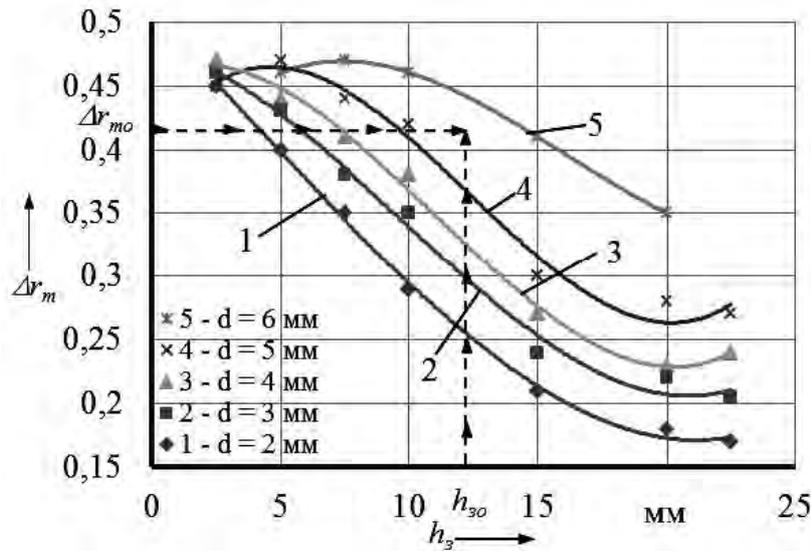


Рис. 6. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения пленки  $\Delta r_m$  в зоне индикаторного рисунка дефекта от глубины залегания  $h_3$  дефекта в пластине толщиной 25 мм: 1 –  $d = 2$  мм; 2 –  $d = 3$  мм; 3 –  $d = 4$  мм; 4 –  $d = 5$  мм; 5 –  $d = 6$  мм;  $H_0 = 275$  А/см

Затем строили графики зависимости максимального приращения коэффициента отражения пленки  $\Delta r_m$  от диаметра отверстия при постоянной глубине его залегания (рис. 7). Из рисунка видно, что с увеличением диаметра несплошности происходит монотонное увеличение  $\Delta r_m$ . По графикам можно найти искомую величину диаметра отверстия  $d_{x0}$  по определенной ранее глубине его залегания  $h_{30}$ , восстанавливая перпендикуляр из точки оси, соответствующей  $\Delta r_{m0}$  обнаруженного дефекта, до пересечения с графиком  $d(\Delta r_m)$ , соответствующим найденной глубине залегания дефекта  $h_{30}$ , и проецируя ее на ось  $d$ .

Для определения диаметра дефекта можно воспользоваться номограммами, изображенными на рис. 6. С этой целью восстанавливают перпендикуляры из точек осей координат, соответствующих найденным значениям  $h_3$  и  $\Delta r_m$ , до их пересечения. Точка пересечения укажет диаметр цилиндрической несплошности в пластине толщиной 25 мм.

На рис. 7 представлены графики зависимости максимального приращения коэффициента отражения визуализирующей магнитные поля пленки в зоне

индикаторных рисунков дефектов диаметром 2 мм от напряженности намагничивающего поля при различной глубине залегания дефекта в пластине толщиной 25 мм. Из рисунка видно, что с увеличением напряженности поля происходит рост  $\Delta r_m$ . Чем меньше глубина залегания дефекта, тем при меньшей напряженности поля наблюдается насыщение  $\Delta r_m$ . Ранее отмечалось, что поле внутреннего дефекта становится заметным только при некотором пороговом значении  $H_0$  тем большим, чем толще покрывающий дефект слой металла [8, 9], т. е. минимальное значение напряженности поля, при котором появляется индикаторный рисунок внутреннего дефекта, может также служить информационным параметром при определении глубины залегания дефекта. Анализ полученных экспериментальных кривых  $\Delta r_m(H)$  подтверждает это, однако установлено, что отличие значений напряженностей полей, при которых  $\Delta r_m$  становится заметным, для дефектов, расположенных на глубине от 2,5 до 22,5 мм, невелико. Поэтому на практике по этим значениям напряженности поля довольно сложно судить о глубине залегания дефекта.

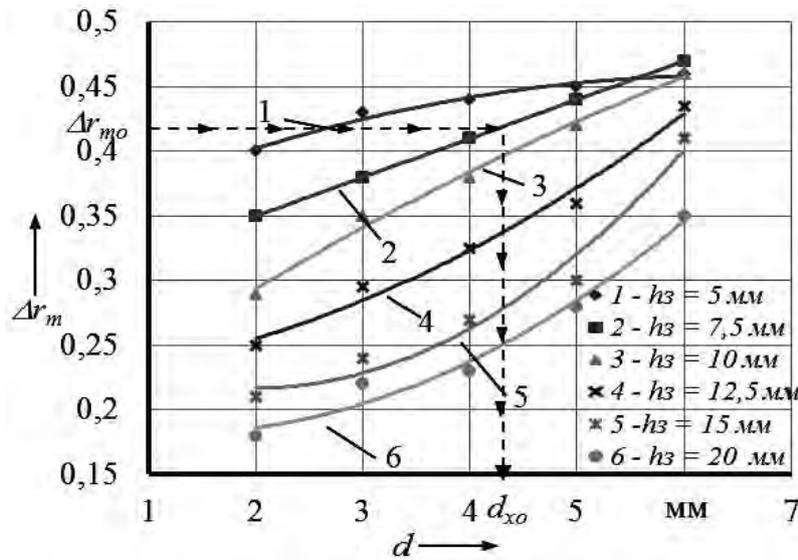


Рис. 7. Графики зависимостей максимального приращения коэффициента отражения пленки  $\Delta r_m(d)$  от диаметра отверстия при глубине залегания: 1 -  $h_3 = 5$  мм; 2 -  $h_3 = 7,5$  мм; 3 -  $h_3 = 10$  мм; 4 -  $h_3 = 12,5$  мм; 5 -  $h_3 = 15$  мм; 6 -  $h_3 = 20$  мм;  $H_0 = 275$  А/см

Анализ полученных на рис. 8 зависимостей показывает, что чем меньше глубина залегания дефекта, тем при меньшей напряженности намагничивающего поля  $\Delta r_m$  достигает своего максимального значения. Так, если  $h_3 = 2,5$  мм, то это значение напряженности поля составляет около 80 А/см;

при  $h_3 = 10$  мм – 300 А/см; при  $h_3 = 22,5$  мм – 500 А/см (см. штрихпунктирную линию на рис. 8). Следовательно, минимальная напряженность поля, при которой  $\Delta r_m$  стабилизируется, также может являться информационным параметром при определении глубины залегания дефекта.

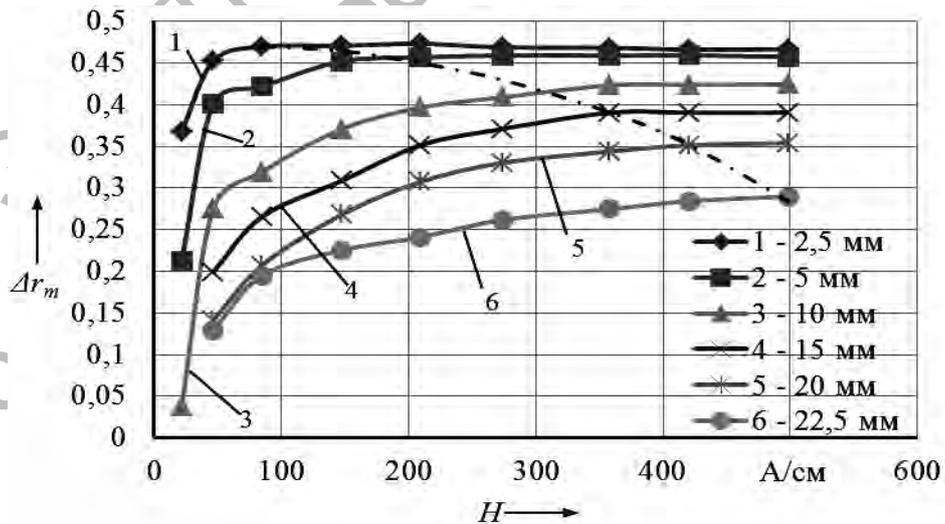


Рис. 8. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта диаметром 2 мм от напряженности намагничивающего поля (пунктирной линией соединены точки, соответствующие минимальной напряженности намагничивающего поля, при котором  $\Delta r_m$  достигает своего насыщения: глубины залегания: 1 -  $h_3 = 2,5$  мм; 2 -  $h_3 = 5$  мм; 3 - 10 мм; 4 -  $h_3 = 15$  мм; 5 -  $h_3 = 20$  мм; 6 -  $h_3 = 22,5$  мм)

### Заключение

В результате проведенных исследований были разработаны:

- экспериментальная установка, состоящая из электромагнита, оптической системы, создающей поток квазипараллельных лучей света, направленных перпендикулярно поверхности объекта исследования, визуализирующей магнитные поля пленки, фотоаппарата для записи цифровых изображений падающего и отраженного от пленки излучений и устройства для их обработки;

- компьютерная программа, позволяющая обработать изображение индикаторного рисунка дефекта на визуализирующей магнитные поля пленке и получить сигнал, коррелирующий с параметрами дефекта и глубиной его залегания в пластине при контроле в приложенном поле; определены информационные параметры сигнала;

- способ экспериментального определения диаметра внутреннего дефекта в ферромагнитном объекте с учетом глубины его залегания при использовании для записи полей дефектов визуализирующей магнитные поля пленки.

Для количественной оценки индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке предложено использовать графики зависимостей коэффициента отражения

света  $r$  магнитной пленки в зоне индикаторных рисунков дефектов ферромагнитного объекта от расстояния  $x$  от их плоскости симметрии в поперечном направлении, имеющих на мониторе компьютера ярко выраженный максимум с двумя симметрично расположенными минимумами. Установлено, что основной вклад в формирование минимумов  $r(x)$  вносит нормальная составляющая поля дефекта. Показано, что расстояние  $l$  между минимумами  $r(x)$  линейно зависит от глубины залегания дефекта в пластине. Данная закономерность нарушается при приближении дефекта к наружной и внутренней поверхностям пластины. Максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  коррелирует с диаметром дефекта. Изменение диаметра несплошности, находящейся на неизменной глубине, не приводит к изменению расстояния  $l$  между минимумами  $r(x)$ . Чем меньше глубина залегания дефекта, тем при меньшей напряженности поля  $\Delta r_m$  стабилизируется. Минимальная напряженность поля, при которой  $\Delta r_m$  стабилизируется, также может являться информационным параметром при определении глубины залегания дефекта. Построены номограммы, позволяющие в образце толщиной 25 мм найти глубину залегания дефекта и его диаметр.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов, В. С. Техника магнитографической дефектоскопии / В. С. Козлов. – Минск : Выш. шк., 1976. – С. 164.
2. ГОСТ 25225-82. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1982. – 13 с.
3. Зацепин, Н. Н. Магнитоэстатическое поле в ферромагнитном пространстве / Н. Н. Зацепин, Э. К. Горбунов // Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности : сб. науч. тр. – Минск, 1973. – С. 140–152.
4. Щербинин, В. Е. Учет влияния границы изделия на поле цилиндрического дефекта / В. Е. Щербинин, М. Л. Шур // Дефектоскопия. – 1976. – № 6. – С. 30–36.
5. Щербинин, В. Е. Влияние границы изделия на величину поля дефекта / В. Е. Щербинин, А. И. Пашагин // Дефектоскопия. – 1976. – № 2. – С. 85–89.
6. Шур, М. Л. Магнитоэстатическое поле дефекта, расположенного в плоскопараллельной пластине / М. Л. Шур, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1977. – № 3. – С. 92–96.
7. Шур, М. Л. Поле цилиндрического дефекта в стенке трубы, намагничиваемой постоянным током на ее оси / М. Л. Шур // Магнитные методы неразрушающего контроля : сб. науч. тр. – Свердловск, 1979. – С. 58–67.

8. **Талицкий, А. В.** Опыт исследований по магнитной дефектоскопии / А. В. Талицкий, М. И. Пожев // Вестн. металлопромышленности. – 1937. – № 2–3. – С. 15.
9. **Халилеев, П. А.** Прибор для магнитного контроля литых и сварных изделий / П. А. Халилеев, В. С. Обухов // Заводская лаборатория. – 1937. – № 10. – С. 1247–1251.
10. **Сапожников, А. Б.** Исследование полей рассеяния от дефектов круглой цилиндрической формы на модели полупространства / А. Б. Сапожников, Е. Д. Макаревич // Тр. СФТИ. – Томск, 1947. – Вып. 24. – С. 240–246.
11. **Сапожников, А. Б.** Поля рассеяния от скрытых дефектов с малым раскрытием / А. Б. Сапожников // Тр. СФТИ. – Томск, 1948. – Вып. 24. – С. 189.
12. **Ильюшенко, Л. Ф.** Исследование магнитных полей рассеяния, образуемых дефектами цилиндрической формы / Л. Ф. Ильюшенко // Тр. ФТИ АН БССР. – 1954. – Вып. 1. – С. 171–175.
13. **Пашагин, А. И.** Исследование магнитостатического поля поверхностных и внутренних дефектов в условиях неоднородного намагничивания применительно к контролю цилиндрических тел : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.11. – Свердловск, 1982. – 20 с.
14. **Новиков, В. А.** Визуализация полей дефектов ферромагнитных объектов с помощью пленки «Flux-detektor» / В. А. Новиков, А. В. Шилов, А. В. Кушнер // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 18–22.
15. **Шилов, А. В.** Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 152–160.
16. **Шилов, А. В.** Количественная оценка индикаторных рисунков дефектов при визуализации их полей на магнитной пленке в приложенном поле / А. В. Шилов, В. А. Новиков, А. В. Кушнер // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 1. – С. 160–168.
17. Перспективные направления магнитографической дефектоскопии в машиностроении / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 76–86.
18. Исследование гистерезисных явлений в магнитной ленте и контролируемом металле с целью повышения достоверности магнитографического контроля металлоконструкций / В. А. Новиков [и др.] // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики : сб. науч. тр. – Минск : Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, 2011. – С. 25–30.
19. Расчет коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в области дефекта / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 105–114.
20. **Новиков, В. А.** Исследование коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в области дефекта / В. А. Новиков, А. В. Шилов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2013. – № 1. – С. 88–98.

Статья сдана в редакцию 28 января 2013 года

**Владимир Алексеевич Новиков**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
**Андрей Владимирович Шилов**, начальник отдела, Белорусско-Российский университет.

**Vladimir Alekseyevich Novikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.  
**Andrei Vladimirovich Shilov**, Head of the Department, Belarusian-Russian University.