

## ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 620.179.14

*В. А. Новиков, А. В. Шилов*

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ПЛЕНКИ, ВИЗУАЛИЗИРУЮЩЕЙ МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ В ОБЛАСТИ ДЕФЕКТА

UDC 620.179.14

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

### THE STUDY OF THE REFLECTION COEFFICIENT OF THE FILM VISUALIZING MAGNETIC FIELDS IN THE DEFECT ZONE

#### **Аннотация**

Установлены экспериментальные зависимости и определен характер изменения коэффициента отражения света в зоне индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке при магнитном контроле ферромагнитных объектов. Дефектоскопию образцов производили в приложенном поле, направленном параллельно контролируемой поверхности. Внешнее световое излучение было направлено перпендикулярно поверхности объекта и уложенной на нее пленки, визуализирующей магнитные поля. Образцы для исследований имели толщину 25 мм и содержали искусственные несплошности в виде профрезерованных канавок и цилиндрических отверстий, расположенных на различной глубине.

#### **Ключевые слова:**

магнитный контроль, дефекты сплошности, визуализация магнитного поля, коэффициент отражения света.

#### **Abstract**

Experimental dependences are received, and it is determined how the light reflection coefficient changes in the zone of indicator pictures of defects on the magnetic fields visualizing film used in the magnetic inspection of ferromagnetic objects. The defectoscopy of test samples was performed in the applied field directed parallel to the surface inspected. External light radiation was directed perpendicular to the surface of the object and the magnetic fields visualizing film placed on it. Test samples were 25 mm thick and had artificial defects of integrity in the form of milled grooves and cylindrical holes located at a different depth.

#### **Key words:**

magnetic inspection, defects of integrity, magnetic field visualization, light reflection coefficient.

В последние годы для неразрушающего контроля ферромагнитных объектов, с целью обнаружения в них дефектов сплошности, начали применять магнитную пленку, визуализирующую магнитные поля [1–5]. Пленка представляет собой немагнитную основу с закрепленными на ней миниатюр-

ными капсулами с гелем, в которых находятся продолговатые частички никеля. В зависимости от своего расположения эти частички по-разному отражают падающий свет. Пленка светлеет, когда частицы располагаются параллельно ее поверхности, и темнеет, когда они ориентированы перпендикулярно.

При дефектоскопии пленку укладывают на поверхность ферромагнитного объекта и намагничивают вместе с ним. Под действием полей рассеяния дефектов, находящихся в объекте, на пленке возникают их индикаторные рисунки, по присутствию которых судят о наличии дефектов в изделии. Метод контроля является индикаторным и не позволяет даже приближенно оценить величину несплошности по виду индикаторного рисунка дефекта. Поэтому разработка методики определения количественных характеристик индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля, в процессе неразрушающего контроля ферромагнитных объектов является важной и актуальной задачей.

В [6] приведены зависимости изменения коэффициента отражения света пленки, визуализирующей магнитные поля, в зоне индикаторных рисунков различных типов дефектов сплошности с учетом их параметров и глубины залегания. Расчет выполнен для случая, когда внешнее световое излучение направлено перпендикулярно поверхности пленки, а контроль ферромагнитных объектов осуществлялся в приложенном поле, параллельном контролируемой поверхности.

Целью работы является экспериментальное подтверждение результатов, полученных расчетным путем. Для определения влияния глубины залегания дефекта на характер изменения коэффициента отражения света в зоне индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля, использовали образец размерами  $350 \times 40 \times 25$  мм из стали Ст3 с отверстиями диаметром 2 мм, выполненными параллельно поверхности образца  $350 \times 40$  мм на глубине от 2,5 до 22,5 мм с шагом 2,5 мм. Для определения влияния глубины дефекта с параллельными гранями, расположенными перпендикулярно контролируемой поверхности, на коэффициент отражения света от плен-

ки в зоне дефекта применяли пластины толщиной 8 мм с дефектом шириной 1,6 мм и глубиной от 0,5 до 3 мм с шагом 0,5 мм.

Экспериментальная установка схематично изображена на рис. 1 и состоит из электромагнита 1 с П-образным сердечником, на котором располагается контролируемый образец 2 с уложенной на его поверхность пленкой 3, визуализирующей магнитные поля, светодиода 4, зеленого светофильтра 5 и конденсора 6, помещенных в корпус 8. Отраженное от пленки световое излучение 10 фиксировали при помощи цифрового фотоаппарата 7. Так как максимальная толщина ферромагнитных образцов с дефектами достигала 25 мм, то толщина полюсов электромагнита составляла 50 мм.

Фотографирование изображений индикаторных рисунков дефектов, возникающих на пленке, при намагничивании объекта контроля осуществляли в приложенном поле электромагнита. Чтобы исключить влияние посторонних источников светового излучения на результаты измерений, съемку производили в темном помещении. В процессе намагничивания магнитоноситель в зоне индикаторных рисунков дефектов фотографировали цифровой камерой в ручном режиме на чувствительности ISO 800. Предварительно фотоаппарат градуировали при помощи нейтрально-серых фильтров. Фотоаппарат располагали таким образом, что угол наблюдения составлял  $12^\circ$ , т. к. максимальное приращение коэффициента отражения пленки  $\Delta r_m$  в зоне индикаторных рисунков дефектов в диапазоне углов наблюдения  $-40^\circ < \alpha < 40^\circ$  изменяется незначительно. Получали его цифровое изображение, из которого попиксельно считывали в массив значения интенсивности составляющей зеленого цвета. Тем самым получали величину, пропорциональную отраженному от пленки световому потоку  $\Phi_r$ . Затем фотоаппарат устанавливали навстречу световому излучению и аналогично определяли вели-

чину, пропорциональную падающему световому потоку  $\Phi_0$ . Строили графики зависимостей коэффициента отражения  $r(x) = \frac{\Phi_r}{\Phi_0(x)}$  от расстояния поперек индикаторных рисунков дефектов.

На рис. 2 представлены экспериментально полученные графики зависи-

мости коэффициента отражения света пленки  $r(x)$  в зоне индикаторного рисунка цилиндрического дефекта диаметром 2 мм в образце от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта при глубине его залегания  $h = 5; 10; 15$  и  $20$  мм. Режим намагничивания  $H_0 \approx 300$  А/см.

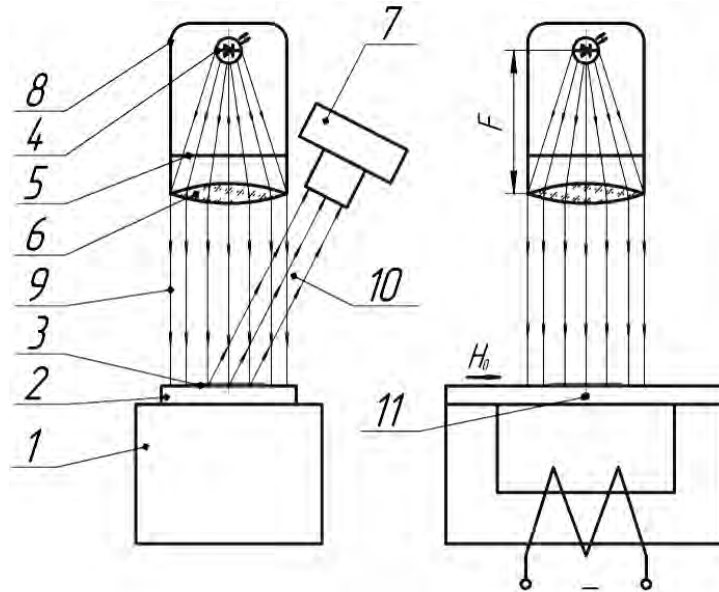


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (на виде сбоку фотоаппарат условно не показан): 1 – электромагнит с П-образным сердечником; 2 – контролируемый образец; 3 – пленка, визуализирующая магнитные поля; 4 – источник света; 5 – светофильтр; 6 – конденсор; 7 – цифровой фотоаппарат; 8 – корпус оптической системы; 9 – падающее световое излучение; 10 – воспринимаемое световое излучение; 11 – внутренний цилиндрический дефект

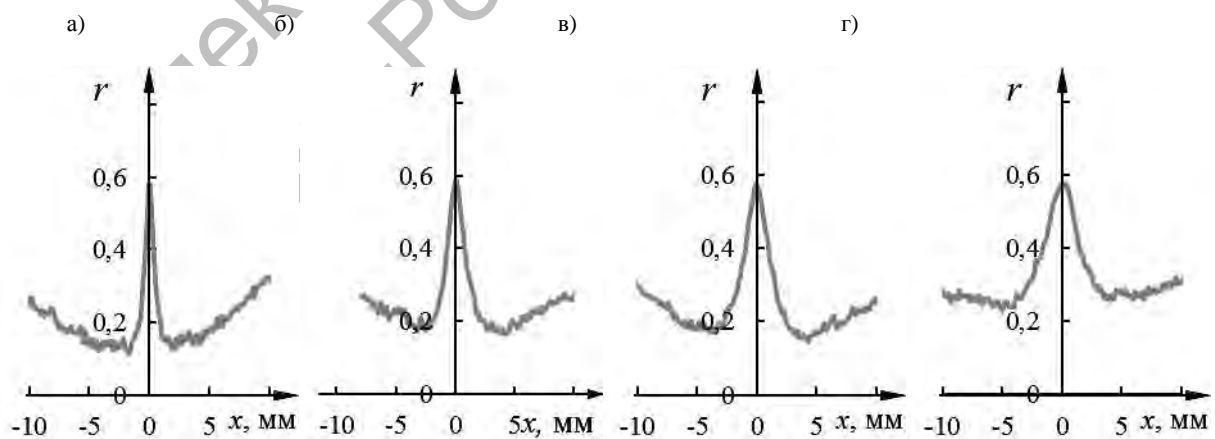


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения света визуализирующей магнитные поля пленки, расположенной на поверхности ферромагнитной пластины толщиной 25 мм в зоне индикаторного рисунка цилиндрического дефекта диаметром 2 мм, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и глубины  $h$  его залегания (режим намагничивания  $H_0 \approx 300$  А/см; глубина залегания: а –  $h = 5$  мм; б –  $h = 10$  мм; в –  $h = 15$  мм; г –  $h = 20$  мм)

Из рисунков видно, что кривая  $r(x)$  имеет ярко выраженный симметричный максимум и два минимума, для которых значение  $r_{\min}$  меньше величины коэффициента отражения для бездефектной поверхности. При этом ось симметрии максимума расположена в области, соответствующей центру дефекта.

Объясним результаты этих экспериментальных исследований. Если бы происходило полное отражение светового излучения от пленки, то на графиках зависимостей  $r(x)$  при отсутствии дефектов в объекте контроля наблюдали бы горизонтальную линию, т. е. отраженное световое излучение в этом случае было бы равно падающему. Разность значений  $r(x)$  при полном и реальном отражении светового излучения

от пленки отражает его потери вследствие поглощения светового излучения пленкой и отражения некоторой ее части внутрь пленки.

Последнее подтверждается тем, что при приближении дефекта к наружной поверхности объекта на высоких режимах намагничивания происходит выравнивание участков кривой, находящихся по обе стороны ярко выраженного симметричного максимума (наблюдаются протяженные горизонтальные отрезки прямых вместо вогнутых кривых на рис. 3), что подтверждает результаты расчета [6]. Однако определить вклад рассеянного в пленку светового излучения в общие его потери – затруднительно.

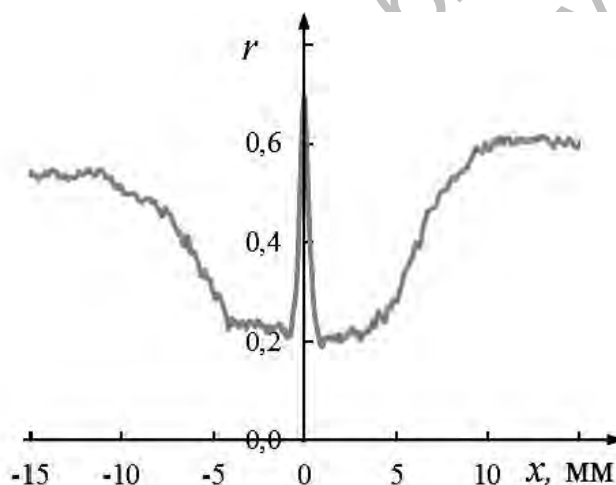


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения света на визуализирующей магнитные поля пленке, расположенной на поверхности ферромагнитной пластины толщиной 25 мм в зоне индикаторного рисунка цилиндрического дефекта диаметром 2 мм, находящегося на глубине 2,5 мм, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта (режим намагничивания  $H_0 \approx 300$  А/см)

Исследования показали, что с увеличением глубины залегания дефекта происходит уменьшение максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта (рис. 4). Это справедливо при различных режимах намагничивания. Однако по мере приближения дефекта к наружной поверхности образца

рост  $\Delta r_m$  замедляется при напряженности поля более 150 А/см, а при приближении к внутренней поверхности замедляется убывание  $\Delta r_m$  при  $H < 85$  А/см.

На рис. 5 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 в пластине толщиной 25 мм. Из графиков видно, что с увеличением напряженности поля про-

исходит рост  $\Delta r_m$ . Чем меньше глубина залегания дефекта, тем при меньшей напряженности поля наблюдается насыщение  $\Delta r_m$ .

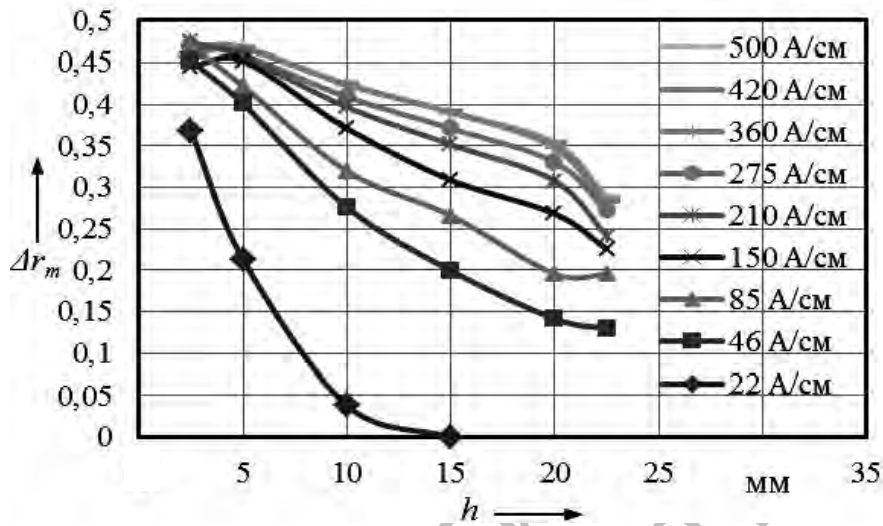


Рис. 4. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка отверстия диаметром 2 мм от глубины его залегания  $h$  в пластине толщиной 25 мм

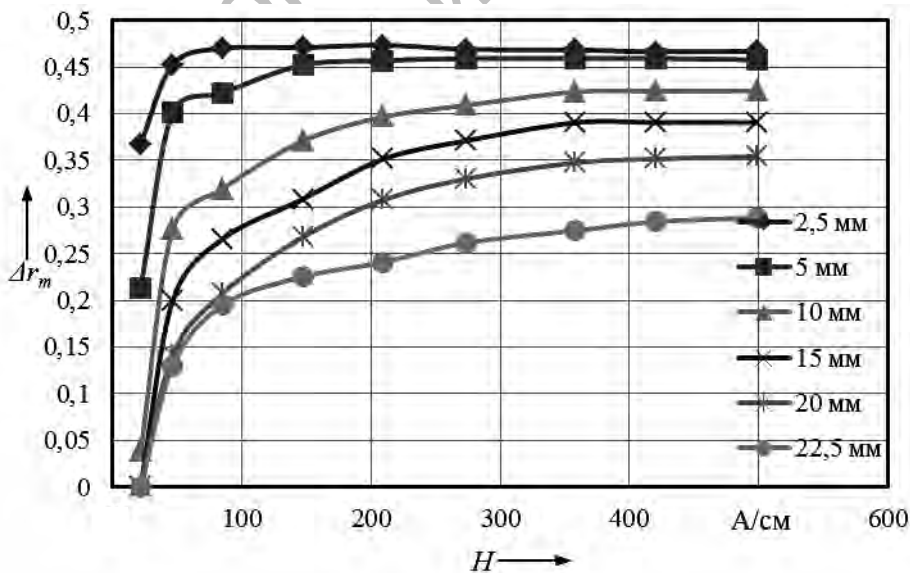


Рис. 5. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта диаметром 2 мм от напряженности намагничивающего поля для глубины залегания дефекта  $h = 5; 10; 15; 20$  мм

На рис. 6, а изображена экспериментальная зависимость коэффициента отражения света  $r(x)$  пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности в виде прямоугольной щели от расстояния от центра дефекта в поперечном направлении (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см; толщина пластины  $s = 8$  мм; ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм; глубина  $h_d = 3,6$  мм). Из рисунка видно, что характер изменения коэффициента отражения света на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на ферромагнитную пластину, намагниченную параллельно ее по-

верхности, когда внешнее световое излучение направлено перпендикулярно поверхности пленки, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля в зоне дефекта (рис. 6, б) на поверхности объекта при контроле в приложенном поле, параллельном контролируемой поверхности. Изменение коэффициента отражения света  $r$  пленки поперек дефекта имеет ярко выраженный симметричный максимум и два минимума по обе его стороны. Этот результат хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований [7, 8].

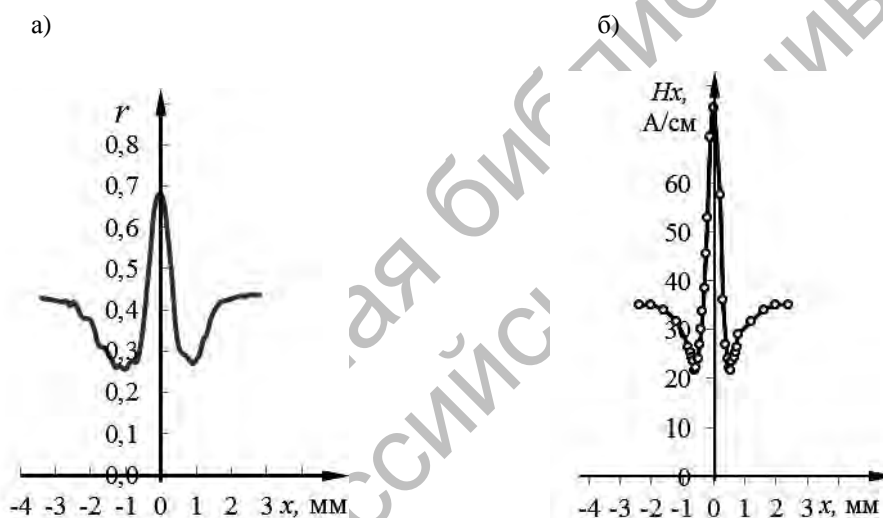


Рис. 6. Сравнение экспериментально полученного коэффициента отражения света на пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности образца (а) и измеренной тангенциальной составляющей напряженности поля в зоне этого дефекта при контроле в приложенном поле, параллельном контролируемой поверхности (б) [9] (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см; толщина пластины  $s = 8$  мм; ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм; глубина  $h_d = 3,6$  мм)

На рис. 7 представлены экспериментальные зависимости коэффициента отражения света  $r$  пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности в виде прямоугольной щели от расстояния от центра дефекта поперек несплошности. Толщина пластины составляла 8 мм, в ней были выполнены дефекты шириной 1,6 мм, глубиной от 0,5 до 3 мм с шагом 0,5 мм. Режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см. Из

рисунка видно, что с увеличением глубины дефекта происходит уменьшение значений  $r_{\min}$  и значительное увеличение ширины  $r_{\min}(x)$ .

На рис. 8 представлены графики зависимостей максимального приращенния коэффициента отражения пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта в зависимости от режима намагничивания для дефекта в виде профрезерованной канавки, расположенной на наружной

поверхности образца. Из рисунка видно, что при больших глубинах несплошностей с увеличением напряженности поля  $\Delta r_m$  в начале возрастает, а затем убывает. Эти результаты качественно подтверждают полученные ранее аналитические зависимости [6].

На рис. 9 показаны графики зависимостей максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки

в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности с параллельными гранями, глубиной  $h_d$ , равной 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 мм, и шириной 1,6 мм от напряженности намагничивающего поля. Из рисунка видно, что с увеличением глубины дефекта происходит линейный рост  $\Delta r_m$ , причем, чем выше режим намагничивания, тем меньший угол наклона прямых.

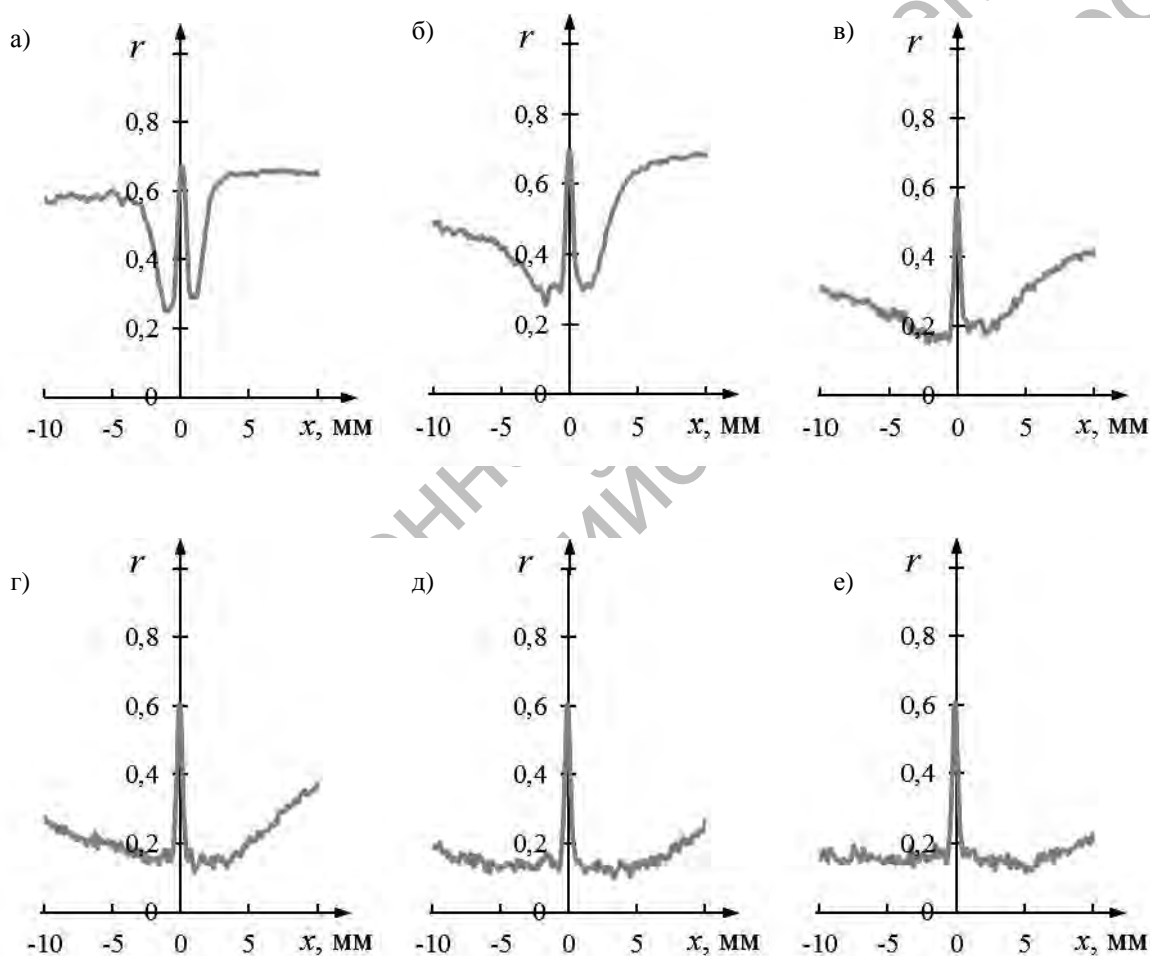


Рис. 7. Экспериментальная зависимость коэффициента отражения света на пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта в виде профрезерованной канавки, расположенной на наружной поверхности ферромагнитного образца, от расстояния от центра дефекта поперек несплошности (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см; толщина пластины  $s = 8$  мм; ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм; глубина: а –  $h_d = 0,5$  мм; б –  $h_d = 1$  мм; в –  $h_d = 1,5$  мм; г –  $h_d = 2$  мм; д –  $h_d = 2,5$  мм; е –  $h_d = 3$  мм)

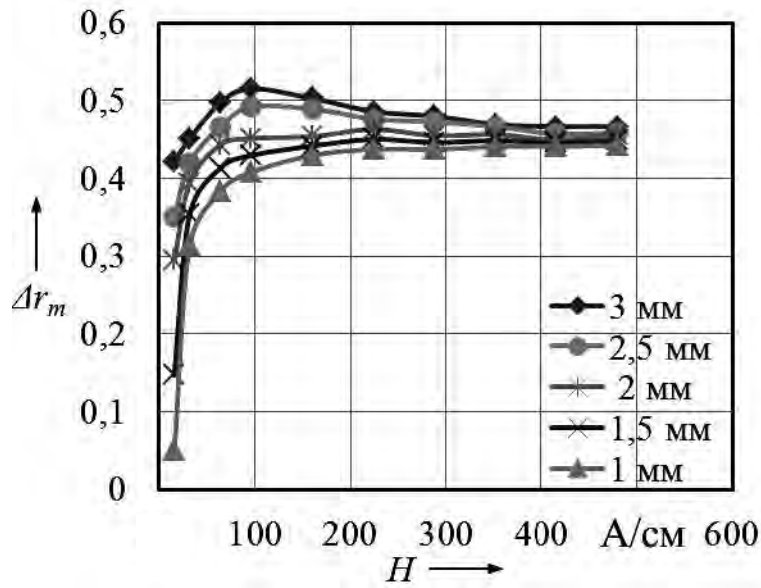


Рис. 8. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности с параллельными гранями, глубиной  $h_d$ , равной 1; 1,5; 2; 2,5 и 3 мм, от напряженности намагничивающего поля при ширине дефекта  $2b = 1,6$  мм

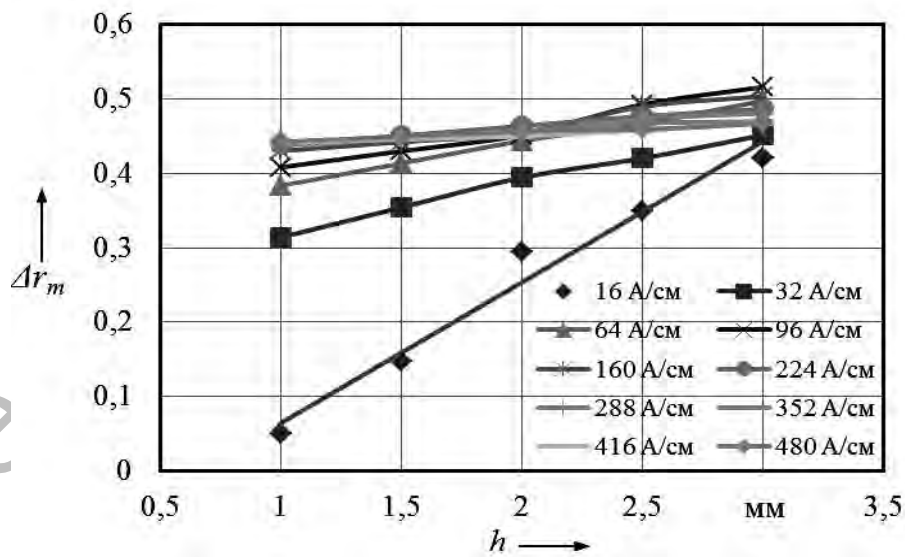


Рис. 9. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности с параллельными гранями, глубиной  $h_d = 1; 1,5; 2; 2,5; 3$  мм и шириной 1,6 мм от напряженности намагничивающего поля

На рис. 10 представлены экспериментальные зависимости коэффициента отражения света  $r$  на пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта внутрен-

ней поверхности в виде прямоугольной щели от расстояния от центра дефекта поперек несплошности. Толщина пластины составляла 8 мм, в ней были



профрезерованы канавки шириной 1,6 мм, глубиной от 0,5 до 3 мм с шагом 0,5 мм. Режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см. Из рисунка видно, что с увеличением глубины дефекта происхо-

дит увеличение ширины вогнутых участков кривой, находящихся по обе стороны ярко выраженного симметричного максимума.

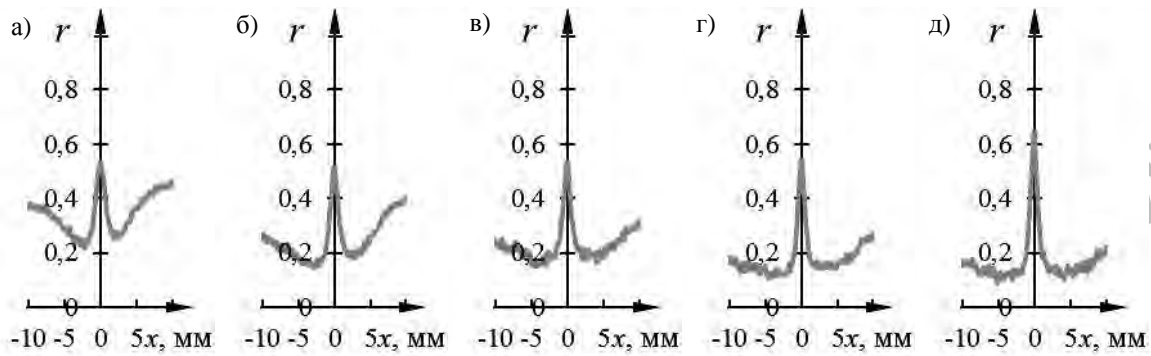


Рис. 10. Экспериментальная зависимость коэффициента отражения света  $r$  на пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта внутренней поверхности в виде прямоугольной щели от расстояния от центра дефекта поперек несплошности (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см; толщина пластины  $s = 8$  мм; ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм; глубина: а -  $h = 1$  мм; б -  $h = 1,5$  мм; в -  $h = 2$  мм; г -  $h = 2,5$  мм; д -  $h = 3$  мм)

Графики зависимостей  $\Delta r_m(H)$  для дефектов внутренней поверхности аналогичны кривым, полученным для внутренних дефектов (рис. 11).

позволяющие определить глубину дефекта внутренней поверхности. В диапазоне напряженностей поля  $64 < H < 480$  А/см эти зависимости имеют практически линейный характер.

На рис. 12 построены номограммы,

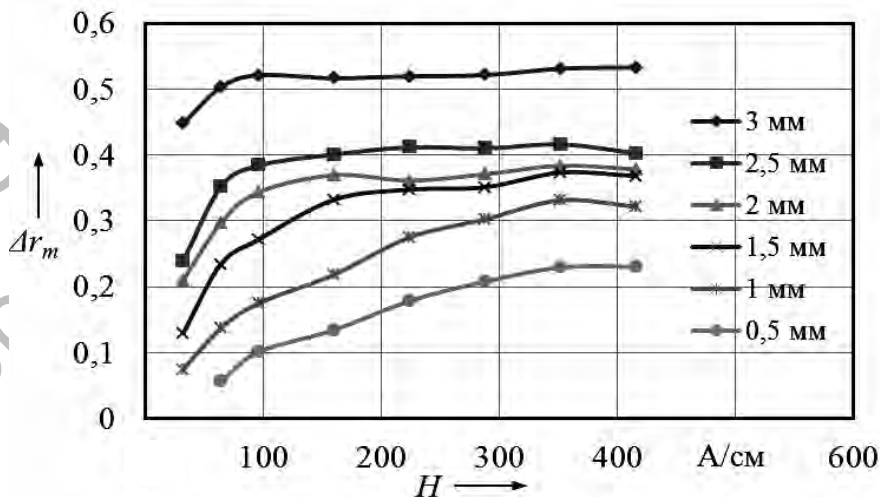


Рис. 11. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта внутренней поверхности с параллельными гранями, глубиной  $h = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3$  мм от напряженности намагничивающего поля

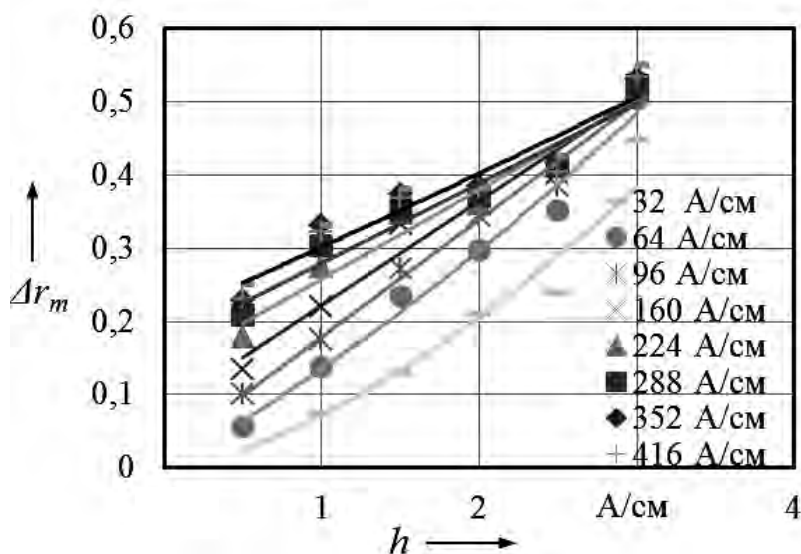


Рис. 12. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта с параллельными гранями, находящегося на внутренней поверхности образца, от глубины дефекта при различных режимах намагничивания

Таким образом, в работе определен характер изменения коэффициента отражения света в зоне индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке для некоторых типов дефектов сплошности с учетом их величины и глубины залегания при контроле объектов в приложенном поле, параллельном поверхности объекта, когда внешнее световое излучение направлено перпендикулярно поверхности пленки.

Установлено, что характер изменения коэффициента отражения света на визуализирующей магнитные поля пленке аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта на поверхности объекта: изменение коэффициента отражения света  $r$  от пленки поперек дефекта имеет вид ярко выраженного симметричного максимума с осью симметрии, проходящей через центр дефекта, и двух минимумов, глубина которых увеличивается с уменьшением глубины залегания дефекта. При этом значение  $r_{\min}$  меньше величины коэффициента отра-

жения на бездефектной поверхности.

С увеличением глубины залегания дефекта в пластине происходит уменьшение максимального приращения  $\Delta r_m$  в зоне его индикаторного рисунка. Это справедливо для различных режимов намагничивания. Однако по мере приближения дефекта к наружной поверхности образца рост  $\Delta r_m$  замедляется при напряженности поля более 150 А/см, а при приближении к внутренней поверхности замедляется убывание  $\Delta r_m$ , если  $H < 85$  А/см.

С увеличением напряженности поля происходит рост  $\Delta r_m$ , обусловленный внутренним дефектом и дефектом внутренней поверхности в пластине толщиной 25 мм. Чем меньше глубина залегания внутреннего дефекта и больше глубина дефекта внутренней поверхности, тем при меньшей напряженности поля наблюдается насыщение  $\Delta r_m$ . Для несплошностей наружной поверхности глубиной больше 2 мм, с увеличением напряженности поля,  $\Delta r_m$  вначале возрастает, а затем убывает.

Построены номограммы, позволяющие определить глубину дефекта внутренней поверхности образца. В

диапазоне напряженностей поля  $64 < H < 480$  А/см эти зависимости имеют практически линейный характер.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. Перспективные направления магнитографической дефектоскопии в машиностроении / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 76–86.
5. 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.
6. Расчет коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в области дефекта / В. А. Новиков [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 104–115.
7. **Щербинин, В. Е.** К расчету магнитостатического поля дефектов. II. Экспериментальная проверка основных расчетных закономерностей / В. Е. Щербинин, Н. Н. Зацепин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.
8. **Зацепин, Н. Н.** Магнитная дефектоскопия / Н. Н. Зацепин, Л. В. Коржова. – Минск : Наука и техника, 1981. – 208 с.

*Статья сдана в редакцию 9 октября 2012 года*

**Владимир Алексеевич Новиков**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0292-45-26-19. E-mail: novikovva@tut.by.

**Андрей Владимирович Шилов**, начальник отдела инновационных технологий, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0297-46-81-23. E-mail: shilov@bru.by.

**Vladimir Alekseyevich Novikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0292-45-26-19. E-mail: novikovva@tut.by.

**Andrei Vladimirovich Shilov**, Head of the Innovation Technologies Department, Belarusian-Russian University. Tel.: 8-0297-46-81-23. E-mail: shilov@bru.by.