

УДК 620.179.14

*В. А. Новиков, Г. И. Скрябина, А. В. Шилов, А. В. Кушнер*

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

UDC 620.179.14

*V. A. Novikov, G. I. Skryabina, A. V. Shilov, A. V. Kushner*

## CALCULATION OF THE REFLECTION COEFFICIENT OF THE MAGNETIC FIELD VISUALIZING FILM IN THE ZONE OF DEFECTS

### Аннотация

Разработана методика расчета коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов. Получены математические выражения, произведен аналитический расчет и определен характер изменения коэффициента отражения света от визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторных рисунков различных типов дефектов сплошности с учетом их формы, параметров и глубины залегания при контроле объектов в приложенном поле для случая, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки.

### Ключевые слова:

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

### Abstract

Methods of calculating the reflection coefficient of the magnetic field visualizing film while monitoring ferromagnetic objects are developed. Mathematical expressions are received, the analytical calculation is performed, and the change of the coefficient of light reflection from the magnetic field visualizing film in the zone of indicator pictures of integrity defects of different types is determined with consideration of their form, parameters and occurrence depth, the objects being monitored in the applied field with an external light flow directed perpendicular to the film surface.

### Key words:

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

Известными средствами визуализации магнитных полей рассеяния дефектов сплошности ферромагнитных изделий являются магнитные порошки, магнитные суспензии и жидкости, магнитная лента, феррит-гранатовая пленка и др. В последние годы для неразрушающего контроля ферромагнитных объектов, с целью обнаружения в них дефектов, начали применять магнитную пленку, визуализирующую магнитные поля [1–5]. Она содержит частички никеля, помещенные в миниатюрные капсулы с гелем

и равномерно распределенные в нем. В зависимости от своего расположения эти частички по-разному отражают падающий свет. Пленка окрашивается в светлые тона, когда частицы располагаются параллельно ее поверхности, и темнеет, когда они ориентированы перпендикулярно. Пленка имеет толщину 0,15 мм и может многократно использоваться для неразрушающего контроля после ее размагничивания.

В процессе контроля пленку укладывают на поверхность ферромагнитно-

го 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. Однако такой метод контроля является индикаторным и не позволяет оценить величину несплошности по виду ее индикаторного рисунка, а также сделать заключение, превышает ли она браковочный уровень, установленный нормативно-технической документацией. Другими словами, при визуализации полей рассеяния дефектов на магнитной пленке индикаторные рисунки дефектов необходимо оценить количественно для сравнения с индикаторными рисунками минимальных недопустимых несплошностей. Поэтому разработка методики расчета количественных характеристик индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов, с целью их количественной оценки, является важной и актуальной задачей.

При рассмотрении указанной задачи примем следующие допущения:

- размагниченная пленка уложена на плоскую поверхность контролируемого ферромагнитного объекта;
- ферромагнитные частицы, находящиеся в капсулах, имеют вытянутую форму и распределены равномерно и ориентированы хаотически;
- размеры частиц много больше длин волн видимого света (дифракция света на частицах отсутствует);
- лучи света направлены перпендикулярно поверхности пленки и проникают лишь в тонкий поверхностный слой геля глубиной не более длины ферромагнитной частицы;
- свет отражается от ферромагнитных частиц, находящихся у поверхности пленки;
- поглощение света ферромагнитными частицами отсутствует;

- суммарный отраженный световой поток зависит от количества ферромагнитных частиц, отражающих свет, их ориентации относительно падающего светового потока и потерь;

- постоянное внешнее поле  $H_0$  направлено параллельно поверхности объекта и пленки, контроль производится в приложенном поле;

- количество ферромагнитных частиц, участвующих в формировании отраженного светового потока, пропорционально отношению суммарной напряженности поля в точке к напряженности поля насыщения  $H_s$  магнитной пленки (напряженности, при которой все ферромагнитные частицы ориентированы параллельно поверхности пленки). Экспериментально установлено, что для исследуемой пленки  $H_s = 60000$  А/м.

Необходимо рассчитать коэффициент отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов.

Расчетная схема изображена на рис. 1. Ферромагнитная частица 1 ориентирована по касательной к силовой линии 2 магнитного поля в некоторой точке  $O$ . Введем систему координат  $XOY$ , как показано на рис. 1.

Ось  $X$  параллельна поверхности магнитной пленки, уложенной на объект контроля, ось  $Y$  – перпендикулярна ей. Внешнее постоянное однородное поле напряженностью  $H_0$  направлено вдоль оси  $X$ . Длина частиц никеля, находящихся в геле, составляет около 50 мкм и на порядок больше их ширины. Поэтому длины волн видимых лучей света (0,4...0,8 мкм) много меньше размеров частиц. В этом случае свет распространяется прямолинейно и его дифракция на частицах отсутствует. Внешний световой поток  $\Phi_0$  падает вдоль оси  $Y$  под углом  $\alpha$  к нормали  $n$  к поверхности частицы и отражается под таким же углом. Если пренебречь потерями, которые происходят при отражении света от пленки, то  $\Phi_r = k\Phi_0$ , где  $k$  –

коэффициент пропорциональности, определяемый конструкцией используемой установки (ее оптической схемой). Примем допущение, что оператор наблюдает встречный (отраженный и рас-

сеянный) световой поток, направленный вдоль оси  $Y$ , а именно  $\Phi_r \cos 2\alpha = k\Phi_0 \cos 2\alpha = k\Phi_0 \cos 2\gamma$ .

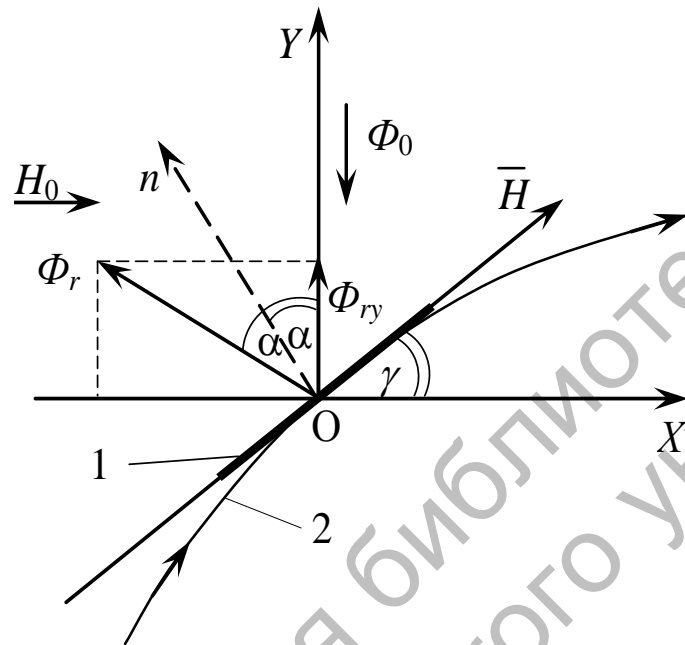


Рис. 1. Расчетная схема оптических характеристик индикаторных рисунков дефектов на пленке, визуализирующей магнитные поля: 1 – ферромагнитная частица, находящаяся в пленке; 2 – силовая линия магнитного поля;  $H_0$  – напряженность намагничивающего поля;  $\Phi_0$ ,  $\Phi_r$ ,  $\Phi_{ry}$  – внешний, отраженный и наблюдаемый световые потоки соответственно

В соответствии с принятыми допущениями наблюдаемый световой поток, направленный вдоль оси  $Y$ ,

$$\Phi_{ry} = k \frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}{H_s} \cdot \Phi_0 \cos 2\alpha. \quad (1)$$

Система уравнений, удовлетворяющая принятым выше допущениям, имеет вид:

$$\begin{cases} \Phi_{ry} = \frac{\sqrt{H_x^2 + H_y^2}}{H_s} \cdot \Phi_0 \cos 2\alpha; \\ \sqrt{H_x^2 + H_y^2} \leq H_s; \\ \cos 2\alpha > 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $H_x = H_0 + H_{xd}$  и  $H_y = H_{yd}$  – тангенциальная и нормальная составляющие поля в точке  $O$  соответственно.

Если  $\cos 2\alpha \leq 0$ , то наблюдаемый световой поток будет направлен навстречу оси  $Y$  и восприниматься не будет.

Для произвольной точки с координатами  $x$  и  $y$

$$\begin{aligned} \cos 2\alpha &= \cos 2\gamma = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma} = \\ &= \frac{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{H_{yd}(x, y)}{H_0 + H_{xd}(x, y)}.$$

Тогда коэффициент отражения света

$$r = \frac{\Phi_{ry}}{k\Phi_0} = \frac{\sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}}{kH_s} \times \frac{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}, \quad (4)$$

а система уравнений (2) принимает вид:

$$\left\{ \begin{aligned} r &= \frac{\Phi_{ry}}{k\Phi_0} = \frac{\sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}}{kH_s} \times \\ &\times \frac{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y)}{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)}; \\ \sqrt{(H_0 + H_{xd}(x, y))^2 + H_{yd}^2(x, y)} &\leq H_s; \\ (H_0 + H_{xd}(x, y))^2 - H_{yd}^2(x, y) &> 0. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Так как в работе определяется относительное изменение коэффициента

отражения, то абсолютное значение величины  $k$  в (5) не требуется.

Для расчета суперпозиции полей в зоне цилиндрического внутреннего дефекта радиуса  $a$ , находящегося в намагниченной ферромагнитной пластине, с учетом влияния границ раздела сред пластина–воздух и пластина–дефект, использованы выражения для  $H_x$  и  $H_y$ , полученные в [6], в системе координат, приведенной на рис. 2.

Результаты расчета коэффициента отражения света  $r$  на визуализирующей магнитные поля пленке, расположенной на поверхности образца в зоне цилиндрического дефекта, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и глубины  $h$  его залегания приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что изменение коэффициента отражения света  $r$  на пленке поперек дефекта имеет колоколообразный вид с максимумом в плоскости симметрии дефекта и двумя минимумами по обе стороны выступа, глубина которых увеличивается с уменьшением глубины залегания дефекта.

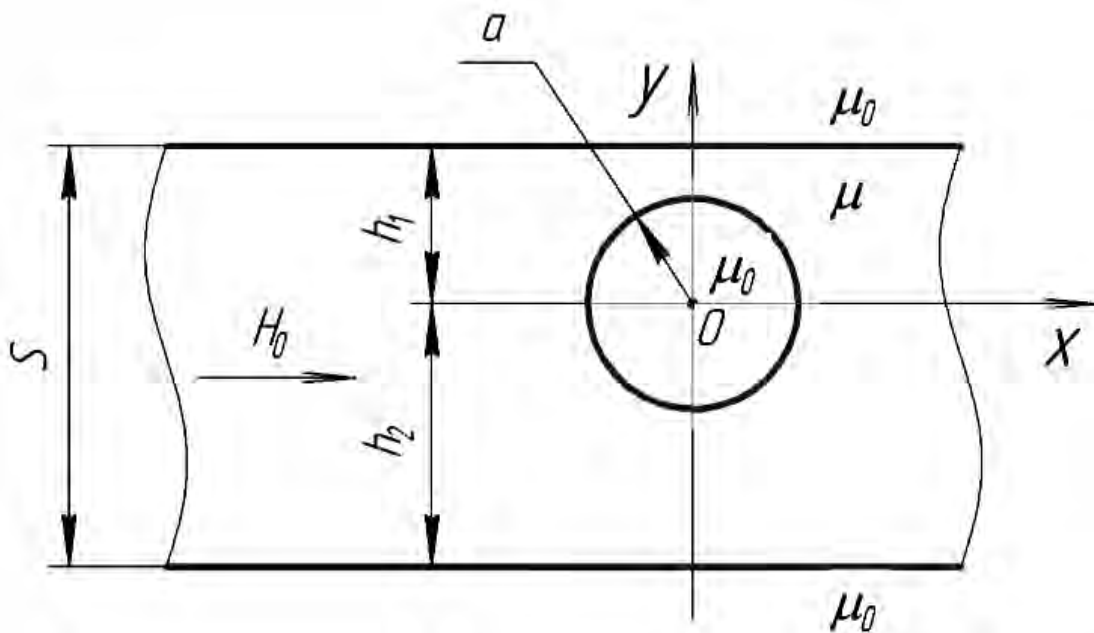


Рис. 2. Положение системы координат при расчете по формулам (6) и (7) суперпозиции полей в зоне дефекта

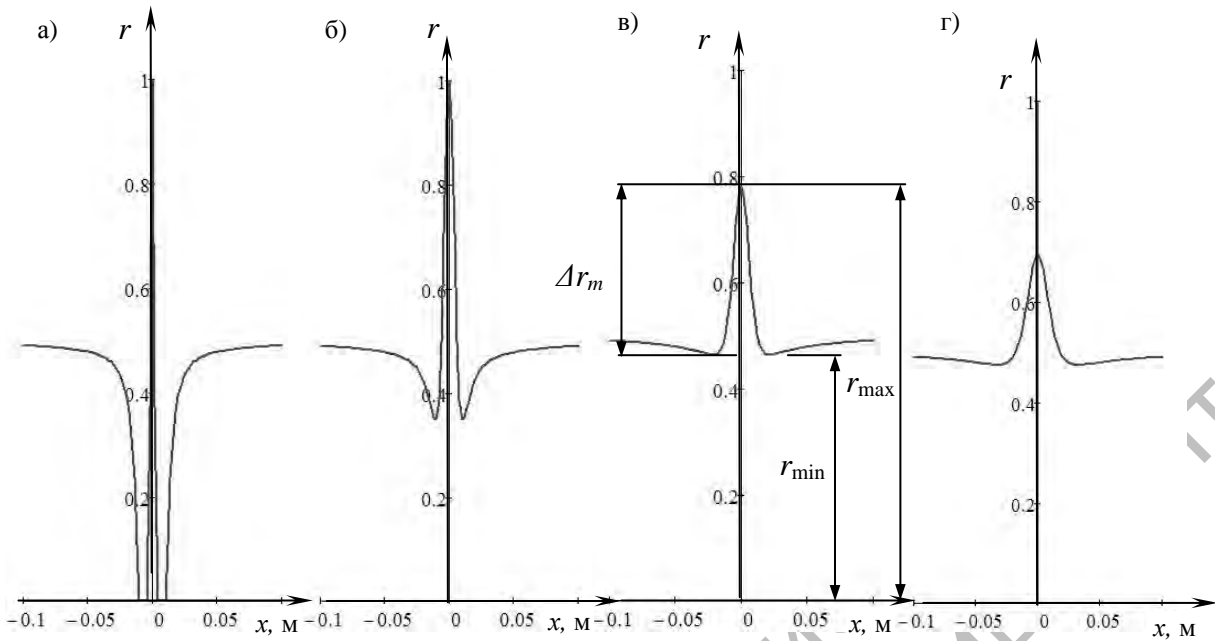


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения света  $r$  на визуализирующей магнитные поля пленке, расположенной на поверхности ферромагнитной пластины толщиной 25 мм в зоне индикаторного рисунка цилиндрического дефекта диаметром 2 мм, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и глубины  $h$  его залегания (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, глубина залегания: а – 5 мм; б – 10 мм; в – 15 мм; г – 20 мм)

Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  на визуализирующей магнитные поля пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта от глубины  $h$  его залегания представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что с увеличением глубины зале-

гания дефекта от 0 до 5 мм максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m = r_{\max} - r_{\min}$  постоянно, а при дальнейшем увеличении  $h_1$  происходит резкое уменьшение  $\Delta r_m$  до  $h_1 = 20$  мм, а затем  $\Delta r_m$  стабилизируется в диапазоне  $20 \geq h_1 \geq 22,5$  мм.

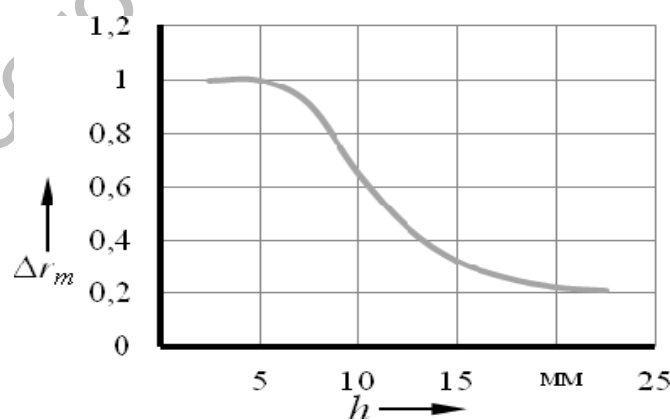


Рис. 4. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  на визуализирующей магнитные поля пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта диаметром 2 мм от глубины его залегания  $h$  в пластине толщиной 25 мм

На рис. 5 представлены графики зависимостей коэффициента отражения света пленки в зонах индикаторных рисунков дефектов от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и его диаметра при глубине залегания дефек-

та  $h = 12,5$  мм. Из рисунка видно, что при диаметрах дефекта 2 мм и более наблюдается «срез» минимумов  $r(x)$ , т. к. на этих участках отраженный свет будет направлен навстречу оси  $Y$  и наблюдателем восприниматься не будет.

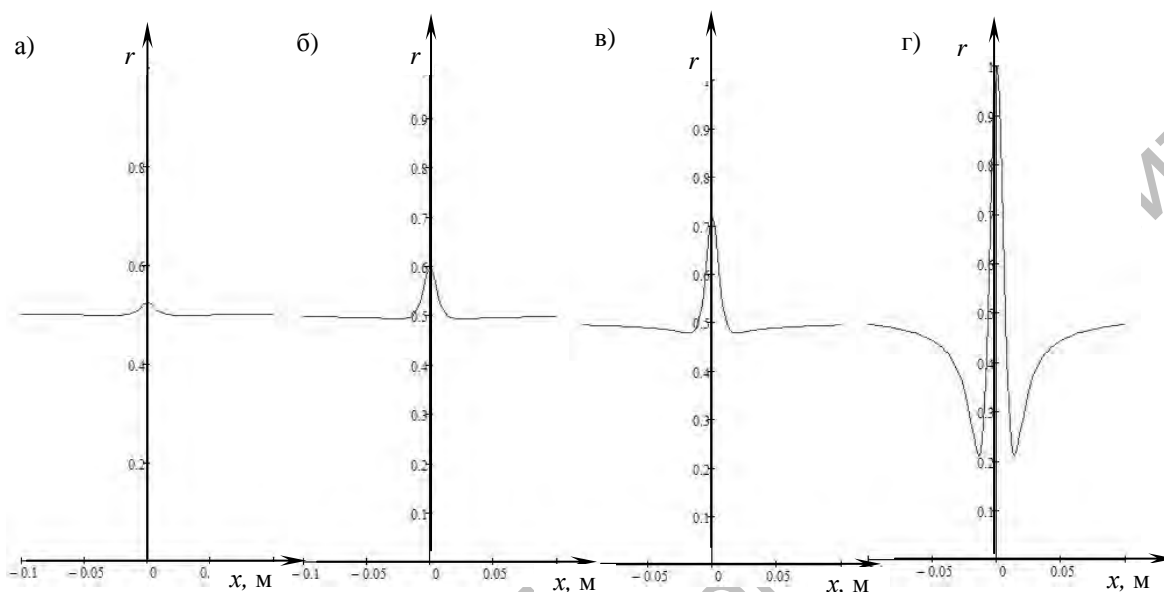


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения света  $r$  пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и его диаметра (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, глубина залегания дефекта  $h = 12,5$  мм, диаметр дефекта  $d = 0,5; 1; 1,5; 2; 3$  мм)

На рис. 6 показана зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от его диаметра при глубине залегания дефекта  $h = 12,5$  мм. Из рисунка видно, что с увеличением диаметра дефекта максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  от пленки, в зоне индикаторного рисунка несплошности, возрастает, пока пленка в зоне дефекта не намагничивается до насыщения при диаметре дефекта 4 мм, затем  $\Delta r_m$  стабилизируется.

На рис. 7 представлены зависимости коэффициента отражения света на

пленке в зоне индикаторного рисунка дефекта диаметром 2 мм, находящегося на глубине 12,5 мм, от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и режима намагничивания. Из рисунка видно, что с ростом напряженности поля вначале происходит увеличение максимального значения приращения коэффициента отражения света, затем его значение стабилизируется, потом происходит убывание  $\Delta r_m$ . Чем меньше глубина залегания дефекта, тем больше  $\Delta r_m$ . Отрицательные части кривой  $r(x)$  при изменении  $H_0$  в диапазоне от 2 до 25 А/см отсутствуют, т. к. соответствуют лучам света, отраженным вглубь пленки. Эти лучи не видны для наблюдателя (рис. 8).

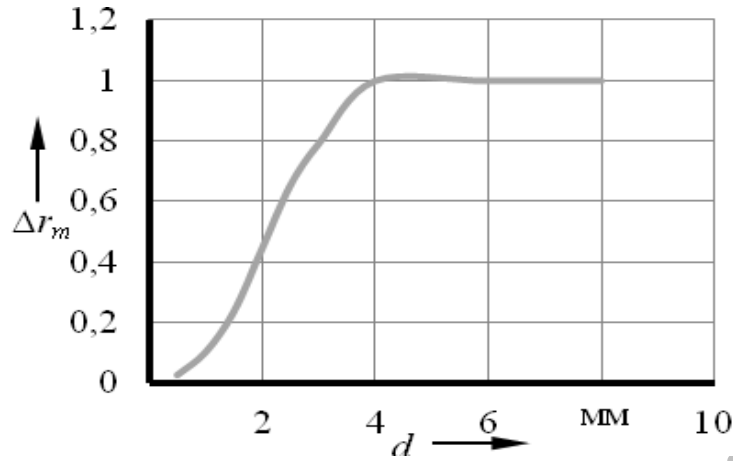


Рис. 6. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от его диаметра (глубина залегания дефекта  $h = 12,5$  мм)

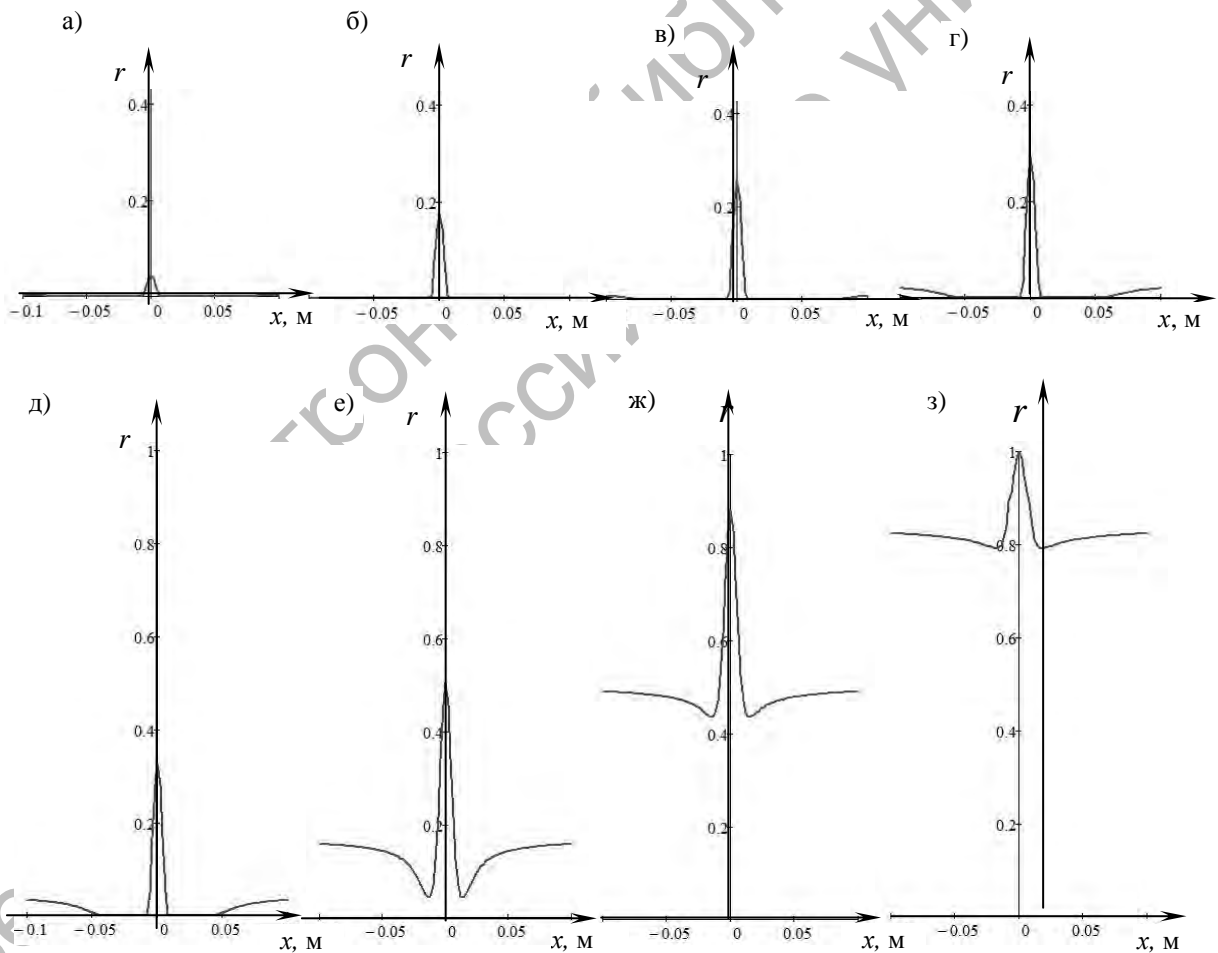


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения пленки в зоне индикаторного рисунка дефекта от расстояния  $x$  до плоскости симметрии дефекта и режима намагничивания (глубина залегания 12,5 мм, диаметр дефекта  $d = 2$  мм, режим намагничивания  $H_0$ : а – 2 А/см; б – 5 А/см; в – 10 А/см; г – 16,5 А/см; д – 25 А/см; е – 100 А/см; ж – 300 А/см; з – 500 А/см)

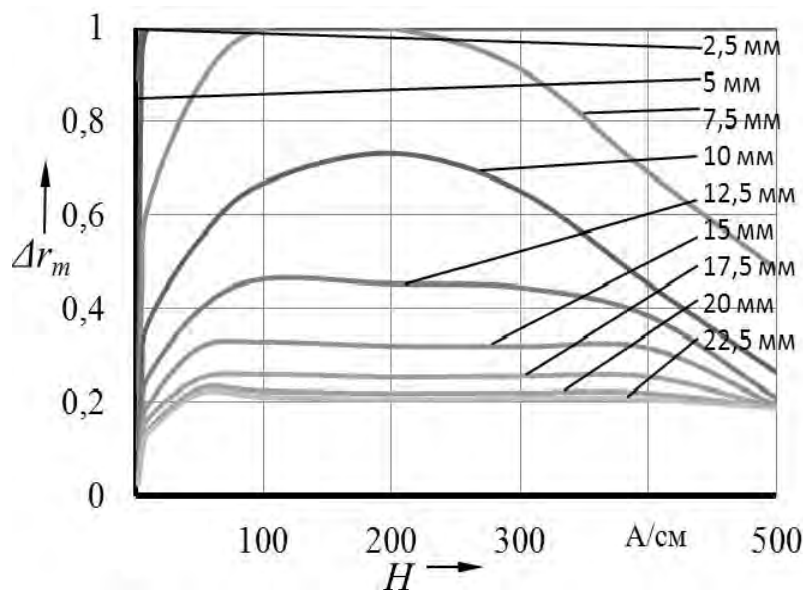


Рис. 8. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка для дефекта диаметром 2 мм от напряженности намагничивающего поля для глубины залегания дефекта  $h = 2,5; 5; 7,5; 10; 12,5; 15; 17,5; 20; 22,5$  мм

Для расчета суперпозиции полей в зоне прямоугольного поверхностного дефекта наружной поверхности, находящегося в пластине, использованы выражения для  $H_x$  и  $H_y$ , полученные в [7], в системе координат, изображенной на рис. 9, и выражение для поверхностной плотности «магнитных зарядов» [8]. Ниже представлены зависимости коэффициента отражения света в зоне индикаторного рисунка прямоугольного поверхностного дефекта наружной поверхности от расстояния до середины дефекта и его глубины (рис. 10), а также его максимального приращения  $\Delta r_m$  от глубины дефекта (рис. 11, а). Графики построены для дефектов шириной 1,6 мм, находящихся в пластине толщиной 8 мм при режиме намагничивания  $H_0 = 300$  А/см. Из рис. 10 видно, что характер изменения  $r(x)$  для наружных дефектов прямоугольной формы аналогичен характеру изменения  $r(x)$  для внутренних дефектов цилиндрической формы, удаленных от поверхности. С ростом глубины несплошности происходит увеличение коэффициента отражения света на поверхности пленки в зоне дефекта (см. рис. 10).

Из рис. 11 видно, что характер изменения коэффициента отражения света индикаторного рисунка дефекта на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на ферромагнитную пластину, намагниченную параллельно ее поверхности, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта на поверхности объекта. Близок и характер изменения поля внутреннего дефекта.

С ростом глубины несплошности происходит также увеличение максимального приращения коэффициента отражения света на поверхности пленки в зоне дефекта (рис. 12, а). С увеличением ширины дефекта наружной поверхности от 0,1 до 1,5 мм наблюдается возрастание  $\Delta r_m$ , а затем его монотонное убывание при дальнейшем увеличении ширины (рис. 12, б).

Таким образом, разработана методика расчета коэффициента отражения пленки, визуализирующей магнитные поля, в процессе контроля ферромагнитных объектов.



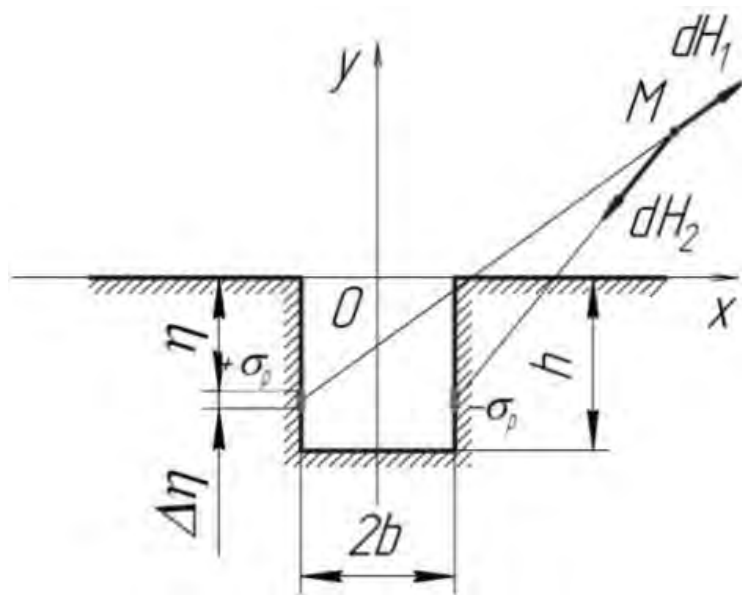


Рис. 9. К расчету поля прямоугольного поверхностного дефекта

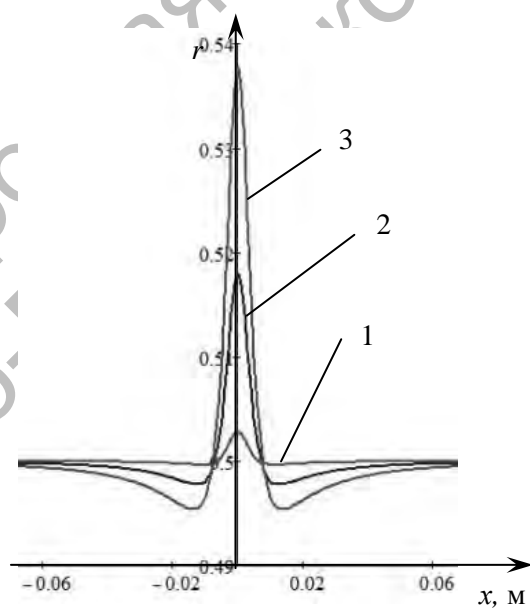


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения света визуализирующей магнитные поля пленки в зоне индикаторного рисунка прямоугольного поверхностного дефекта наружной поверхности от расстояния  $x$  от плоскости симметрии дефекта и его глубины  $h$  (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, толщина пластины  $s = 8$  мм, ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм, глубина: 1 – 1 мм; 2 – 2 мм; 3 – 3 мм)

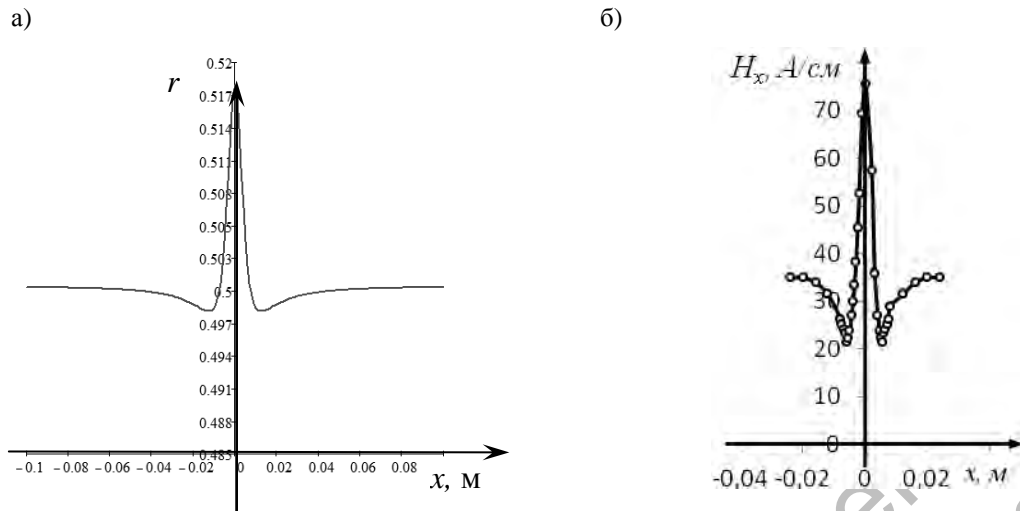


Рис. 11. Сравнение коэффициента отражения света  $r(x)$  индикаторного рисунка дефекта наружной поверхности в виде прямоугольной щели на пленке (а) и его тангенциальной составляющей поля рассеяния [9] (б) (режим намагничивания  $H_0 = 300$  А/см, толщина пластины  $s = 8$  мм, ширина дефекта  $2b = 1,6$  мм, глубина  $h = 3,6$  мм)

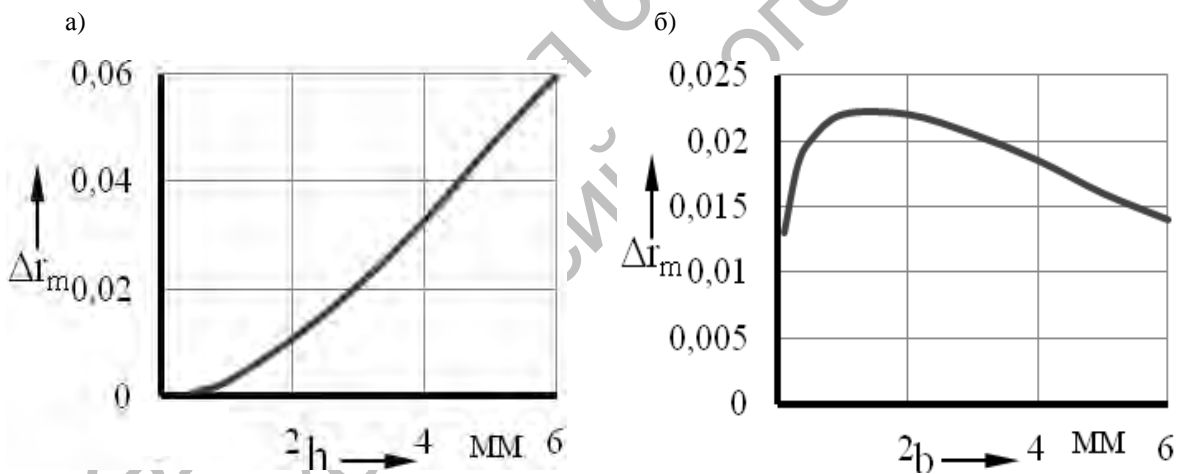


Рис. 12. Зависимость максимального приращения коэффициента отражения  $\Delta\Gamma_m$  света в зоне индикаторного рисунка прямоугольного поверхностного дефекта на пленке от его глубины  $h$  (а) и ширины  $2b$  (б) при напряженности поля  $H_0 = 300$  А/см: а – ширина дефекта 1,6 мм; б – глубина дефекта 3 мм

Получены математические выражения, произведен аналитический расчет и определен характер изменения коэффициента отражения света в зоне индикаторных рисунков дефектов на визуализирующей магнитные поля пленке для различных типов дефектов сплошности с учетом их формы, параметров и

глубины залегания при контроле объектов в приложенном поле для случая, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки.

Теоретически установлено, что характер изменения коэффициента отражения света на визуализирующей магнитные поля пленке, уложенной на

ферромагнитную пластину, намагниченную параллельно ее поверхности, когда внешний световой поток направлен перпендикулярно поверхности пленки, аналогичен характеру изменения тангенциальной составляющей поля рассеяния дефекта на поверхности объекта: изменение коэффициента отражения света  $r$  от пленки поперек дефекта имеет колоколообразный вид с максимумом в плоскости симметрии дефекта и двумя минимумами по обе стороны выступа, глубина которых увеличивается с уменьшением глубины залегания дефекта.

С увеличением глубины залегания дефекта  $h_1$  от 0 до 5 мм максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m = r_{\max} - r_{\min}$  постоянно, а при дальнейшем увеличении  $h_1$  происходит резкое уменьшение  $\Delta r_m$  до  $h_1 = 20$  мм, а затем  $\Delta r_m$  стабилизируется в диапазоне  $20 \geq h_1 \geq 22,5$  мм. При увеличении диаметра дефекта максимальное приращение коэффициента отражения света  $\Delta r_m$  от пленки в зоне индикаторного рисунка несплошности возрастает, пока пленка в зоне дефекта не намагничивается до насыщения, затем  $\Delta r_m$  стабилизируется. С ростом напряженности поля

происходит увеличение максимального значения приращения коэффициента отражения света, затем его значение стабилизируется, а потом происходит убывание  $\Delta r_m$ .

Отрицательные части кривой  $r(x)$  при изменении  $H_0$  в диапазоне от 2 до 25 А/см, а также при диаметрах дефекта от 2 мм и более ( $H_0 = 300$  А/см) отсутствуют, т. к. соответствуют лучам света, отраженным вглубь пленки. Эти лучи не видны для наблюдателя.

Характер изменения  $r(x)$  для индикаторных рисунков дефектов наружной поверхности в виде щели с параллельными стенками, перпендикулярными поверхности пластины, аналогичен характеру изменения  $r(x)$  индикаторных рисунков от внутренних дефектов цилиндрической формы, удаленных от поверхности на расстояние больше 10 мм. С ростом глубины несплошности происходит увеличение коэффициента отражения света и его приращения на поверхности пленки в зоне дефекта. С увеличением ширины дефекта наружной поверхности от 0,1 до 1,5 мм наблюдается возрастание  $\Delta r_m$ , а затем его монотонное убывание при дальнейшем увеличении ширины.

#### 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. Шур, М. Л. Магнитостатическое поле дефекта, расположенного в плоскопараллельной пластине / М. Л. Шур, В. Е. Щербинин / Дефектоскопия. – 1977. – № 3. – С. 92–96.
7. Зацепин, Н. Н. К расчету магнитостатического поля дефектов. 1. Топография полей дефектов / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.

8. **Шур, М. Л.** Теоретические вопросы формирования поля поверхностного дефекта / М. Л. Шур, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1988. – № 3. – С. 14–25.

9. **Щербинин, В. Е.** К расчету магнитостатического поля дефектов. II. Экспериментальная проверка основных расчетных закономерностей / Н. Н. Зацепин, В. Е. Щербинин // Дефектоскопия. – 1966. – № 5. – С. 50–59.

*Статья сдана в редакцию 13 сентября 2012 года*

**Владимир Алексеевич Новиков**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет.

**Галина Ивановна Скрябина**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

**Андрей Владимирович Шилов**, начальник отдела, Белорусско-Российский университет.

**Андрей Валерьевич Кушнер**, канд. техн. наук, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

**Vladimir Alekseyevich Novikov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University.

**Galina Ivanovna Skryabina**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

**Andrei Vladimirovich Shilov**, Head of the department, Belarusian-Russian University.

**Andrei Valeryevich Kushner**, PhD (Engineering), senior lecturer, Belarusian-Russian University.