

3.2 Алгоритм определения гомогенности и фазового состава ферритов по изменениям температуры Кюри термомагнитометрическим методом.

3.3 Проведение калибровки по температурам Кюри эталонных образцов ферритовых материалов.

3.4 Разработка программного обеспечения, позволяющего проводить анализ фазового состава ферритов с помощью компьютерного моделирования

### **Список информационных источников**

1. Горелик С.С. и др. Рентгенографический и электронографический анализ. М.: Металлургия, 1976. - 60 с.;

2. МГ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА, Кафедра физики полимеров и кристаллов. Обработка экспериментальных данных [Электронный ресурс]. - режим доступа: [http://nano.msu.ru/files/systems/4\_2010/practical/01];

3. Обработка экспериментальных данных [Электронный ресурс]. - режим доступа: [http://kipinfo.ru/info/stati/?id=51].

## **СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ПЛОЩАДИ ОПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ НА ПЛОСКОМ ИЗДЕЛИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ФОТОИЗОБРАЖЕНИЙ**

*Осипов О.С., Алибекова А.А., Чесноков Д.В.*

*Томский политехнический университет, г. Томск*

*Научный руководитель: Осипов С.П., к. т.н., доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества*

***Аннотация.** Приведен способ измерения площади оптической неоднородности на плоском изделии на основе анализа фотографических изображений. Предложен алгоритм уточнения оценки площади контрастной области на основе учёта граничных эффектов. Исследовано влияние различных факторов, снижающих точность оценки площади. Обсуждены области применения предлагаемого способа.*

***Ключевые слова:** фотоизображение, цветное изображение, оптическая неоднородность, оптический контраст, цветной контраст, измерение плотности.*

### *Введение*

Традиционная фотография широко применяется для фиксации событий и прямого документирования не только в быту, но и в науке и технике. Появление в конце 20-го века и резкое развитие цифровой фо-

тографии в последнее десятилетие превратило цифровой фотоаппарат (фоторегистратор) в средство для косвенных измерений. Одним из достоинств цифровых оптических изображений является возможность применения методов цифровой обработки изображений с целью выделения и анализа фрагментов, очерчивания границ и т. д. [1–5]. Одним из таких видов измерений является измерение площади оптических неоднородностей. Под оптической неоднородностью на плоскости будем понимать некоторую фигуру, ограниченную замкнутой кривой, для которой характерна однородность по тону (полутоновое изображение) или цвету (цветное изображение) и различие с окружающей областью по указанным параметрам. Задачи, связанные с измерением площадей оптических неоднородностей, характерны для многих отраслей науки и технике. К таким задачам относятся: собственно измерение площадей измерений [6]; измерение параметров движения разнообразных объектов [3, 4]; измерение площадей объектов малых размеров [7]; дистанционная оценка площадей полей [8]; площади следов дефектов в капиллярной дефектоскопии [9]. В литературе недостаточно рассмотрены вопросы, связанные с оценкой площадей оптических неоднородностей в части алгоритмического и метрологического обеспечения.

#### *Геометрическая схема формирования фотоизображения*

Измерительная система должна состоять из фотокамеры, устройства фиксации геометрического положения, источника света, стандартного образца (образцов) площади и вспомогательной контрастирующей площадки. Стандартные образцы должны иметь правильную геометрическую форму – круг, треугольник, прямоугольник. Стандартные образцы площади используются в парах со вспомогательными контрастирующими площадками. При анализе полутоновых изображений стандартный образец площади окрашен, например, в белый цвет, а вспомогательная площадка в чёрный. При анализе цветных изображений между цветами стандартного образца и вспомогательной площадки должен быть максимальный цветовой контраст. Обязательным требованием к форме вспомогательной контрастирующей является условие – минимальная ширина изображения граничной полосы, образующейся при накладывании стандартного образца площади на вспомогательную контрастирующую площадку, должна быть не менее  $l$  пикселей, где  $l$  – выбираемый параметр. Далее комплект стандартный образец площади и вспомогательная контрастирующая площадка будем называть образцом. Для получения качественного изображения объект испытаний должен подсвечиваться источником светового излучения, обеспечивающим максимальный контраст оптической неоднородности относительно окру-

жающего фона. Для обеспечения качественной калибровки образец накладывается непосредственно на объект испытаний. При невозможности наложения на объект формируется отдельное фотоизображение образца на произвольной плоской площадке (имитационный объект) с такой же ориентацией её относительно фоторегистратора, как и в случае формирования изображения объекта. Аналогичные требования выдвигаются и к расстоянию от фоторегистратора до имитационного объекта.

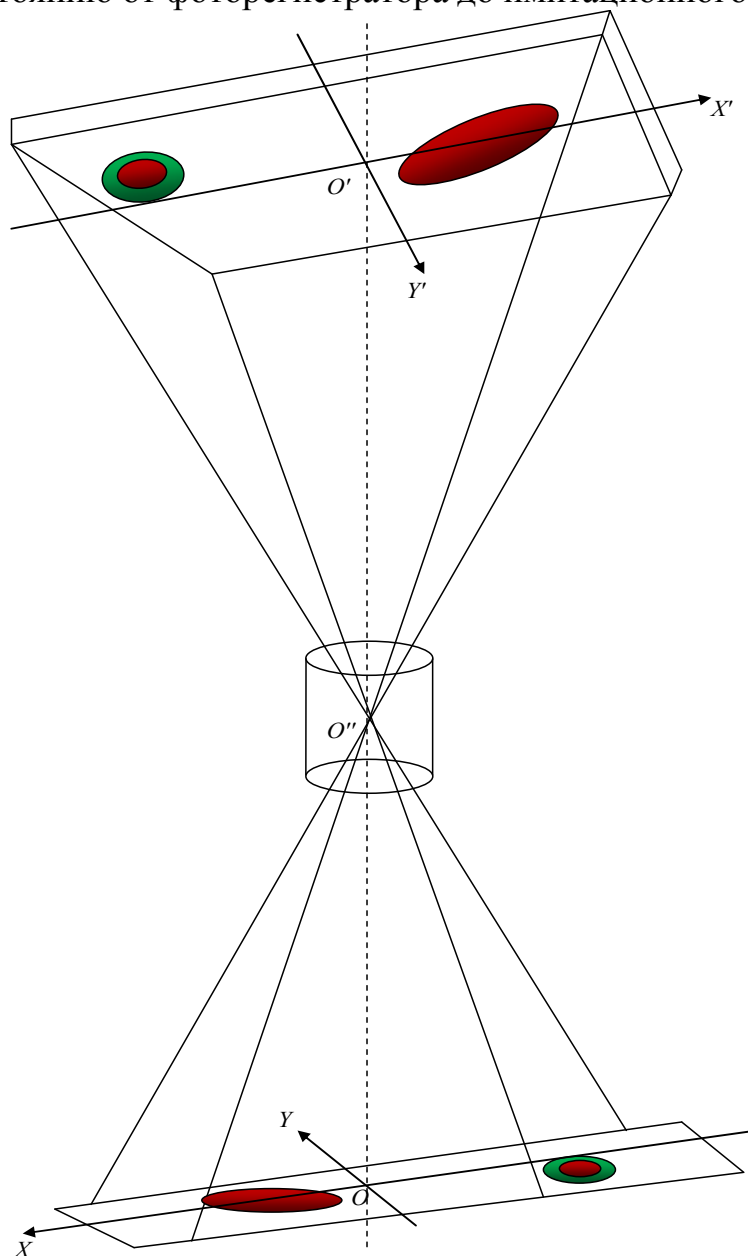


Рис. 1. Геометрическая схема формирования изображения оптической неоднородности и образца

На рис. 1 приведена геометрическая схема формирования фотографического изображения объекта испытаний с оптической неоднородностью

родностью: 1 – объект испытаний; 2 – оптическая неоднородность, 3 – стандартный образец площади; 4 – вспомогательная контрастирующая площадка; 5 – источник света; 6 – фоторегистратор; 7 – фотоматрица (собственно изображение).

Свяжем систему координат  $X'O'Y'$  с поверхностью объекта испытаний со стороны фоторегистратора, а систему координат  $XOY$  с плоскостью оптического изображения. Лобовая поверхность матрица фоторегистратора является плоской и ограничена прямоугольником. Оси  $x$  и  $y$  параллельны соответствующим сторонам указанного прямоугольника.

Для удобства направим оси  $x'$  и  $x$  в противоположные стороны. Таким же образом поступим и с осями  $y'$  и  $y$ . Пусть отрезок  $OO'$  перпендикулярен поверхности объекта и плоскости изображения. Оптический центр  $O''$  фоторегистратора принадлежит  $OO'$ . Геометрическая схема формирования оптического изображения характеризуется рядом параметров: расстоянием от объекта испытаний до оптического центра объектива фоторегистратора –  $O'O''=F$ ; расстоянием от оптического центра объектива фоторегистратора до плоскости изображения –  $O''O=f$ ; размером поля изображения –  $A \times B$ ; размером фотоматрицы –  $a \times b$ . Следует также учесть диаметр стандартного образца площади –  $C$ , диаметр вспомогательной контрастирующей площадки –  $D$ ; размер изображения стандартного образца площади –  $c$ , размер изображения вспомогательной контрастирующей площадки.

Для идеальной изображающей системы геометрические параметры объекта испытаний  $A, B, C, D$  связаны с геометрическими параметрами изображения объекта  $a, b, c, d$  простейшими соотношениями

$$\frac{A}{a} = \frac{B}{b} = \frac{C}{c} = \frac{D}{d} = \frac{F}{f} \quad (1).$$

Назовём отношение  $f/F$  коэффициентом линейного преобразования  $k$ .

*Замечание 1.* Соотношения (1) справедливы для бесконечно малого размера точки изображения. В реальности каждый элемент фотоматрицы, соответствующий пикселю оптического изображения, имеет конечные размеры  $r_x \times r_y$ .

Для обоснования возможности оценки площади оптической неоднородности по оптическому изображению необходимо проверить соблюдение двух базовых принципов – принципов физической и технической реализуемости.

**Физическая реализуемость.** Принцип физической реализуемости заключается в наличии физической закономерности, которая связывает измеряемую физическую величину с оцениваемым параметром объекта испытаний.

В рассматриваемой задаче измеряемой физической величиной является площадь изображения оптической неоднородности  $s$ , а оцениваемым параметром объекта испытаний – площадь оптической неоднородности на поверхности объекта  $S$ .

Пусть на поверхности объекта имеется оптическая неоднородность, представляющую собой односвязную область  $Q'$ , граница которой  $FrQ'$  описывается следующим образом

$$FrQ' = \{(x', y'), q(x', y') = 0\}, \quad (2)$$

здесь  $q(x', y')$  – функция, к которой выдвигается единственное требование – непрерывность.

Площадь оптической неоднородности  $Q' - S$  находится с помощью выражения

$$S = \int_{Q'} q(x', y') dx' dy'. \quad (3)$$

Не теряя общности можно допустить параллельность осей  $O'X'$ ,  $OX$  и  $O'Y'$ ,  $OY$ . Это допущение является естественным в том случае, если поле зрения объектива фоторегистратора является частью поверхности испытываемого объекта.

Найдём площадь изображения оптической неоднородности  $s$ . Для этого необходимо связать точку с координатами  $(x', y')$ , принадлежащую поверхности объекта испытаний, с соответствующей точкой изображения с координатами  $(x, y)$ . С учётом (3) замечанием, связанным с направлениями осей систем координат  $X'O'Y'$  и  $XOY$ , получим

$$x = kx' \quad y = ky'. \quad (4)$$

Из анализа равенств (4) и выражения (3) следует, что площадь изображения оптической неоднородности  $s$  находится по формуле

$$s = k^2 S. \quad (5)$$

Формула (5) является искомой физической закономерностью. Задачей является определение коэффициента преобразования  $k$  и площади изображения оптической неоднородности на цифровом оптическом изображении. Коэффициент преобразования  $k$  находится на стадии калибровочных линейных измерений или измерений площади по стандартным образцам площади.

Принцип технической реализуемости заключается в наличии технических средств, позволяющих провести измерения с заданной точностью в заданное время. Применительно к рассматриваемой задаче проверка соблюдения принципа технической интерес сводится к оценке точности измерения  $s$ .

**Техническая реализуемость.** Принцип технической реализуемости заключается в наличии технических средств, позволяющих провести

измерения с заданной точностью в заданное время. Применительно к рассматриваемой задаче проверка соблюдения принципа технической интерес сводится к оценке точности измерения  $s$ . В анализируемом случае к измерительным средствам относятся стандартный образец площади со вспомогательной контрастирующей площадкой, источник светового излучения и фоторегистратор.

Для обоснования технической реализуемости фотографического метода оценки площади необходимо подобрать размеры стандартного образца площади, вспомогательной контрастирующей площадки и фоторегистратор.

Выше подчёркнуто, что основная рекомендация по подбору размеров стандартного образца площади – размер сопоставим с максимально возможным размером оптической неоднородности. Размер вспомогательной контрастирующей площадки должен быть таким, что внешняя контрастная полоса должна быть шириной не менее  $n$  пикселей.

В матрице фоторегистраторе формируется цифровое полутоновое или цветное изображение. Оптическая неоднородность на изображении объекта испытаний отличается от фона полутоновым или цветным контрастом. Погрешность определения площади  $s$  обуславливается тремя главными факторами – геометрическим, шумовым и алгоритмическим. Геометрический фактор связан с тем, что границы изображения неоднородности не совпадают с физическими границами пикселей. В результате этого яркость или цветность в граничных пикселях изображения оптической неоднородности отличается яркости или цветности внутренних пикселей изображения. Шумовой фактор связан с флуктуациями яркости или цветности в элементах изображения оптической неоднородности. Влияние шумового фактора на точность определения площади  $s$  тем больше, чем меньше уровень яркости или цветности. Алгоритмический фактор связан с алгоритмом обработки изображения видимой фоторегистратором части поверхности объекта испытаний. Алгоритм должен минимизировать систематическую погрешность оценки площади изображения оптической неоднородности, вызванной геометрическим и шумовым фактором.

*Алгоритм обработки изображения.* На выходе алгоритма должна быть получена оценка площади изображения оптической неоднородности  $s$ . Изображение на выходе фоторегистратора представляет собой матрицу с размерами –  $M \times N$ ,  $M < N$ , здесь  $M$  – число строк, а  $N$  – число столбцов. Индекс  $m$  соответствует строке изображения, а индекс  $n$  – столбцу. Элемент матрицы характеризуется вектором  $\mathbf{p}$ , для полутонового изображения одномерным вектором – яркостью  $f$ , то есть  $\mathbf{p} = f$ , а

для цветного трёхмерным вектором, например, в системе RGB –  $(r, g, b)$ , то есть  $\mathbf{p}=(r, g, b)$ . Значения параметров  $f, r, g, b$  принимают значения из интервала от 0 до 255 – полутона, «0» соответствует самому тёмному тону цвета, «255» соответствует чистому цвету. Выше сказано, что оптическая неоднородность отличается по оттенку серого (оттенку цвета) от окружающего фона. Это и является критерием отнесения исследуемой точки к оптической неоднородности. Подбором источника светового излучения и способа подсветки достигается максимальный контраст (цветовой контраст).

Аналогично подходу, изложенному в [4], в первом приближении оценка площади  $s$  находится по формуле

$$s \approx s_{\text{pix}} \sum_{(m,n) \in A} 1, \quad (6)$$

где  $s_{\text{pix}}$  – площадь единичного пикселя в метрических единицах; множество точек  $A$  определяется соотношением

$$A = \{(m, n); \mathbf{K}(\mathbf{p}_{mn}, \mathbf{p}_f) > \mathbf{K}_{\text{lim}}\}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{p}_{mn}$  – вектор значений, соответствующий элементу матрицы с координатами  $(m, n)$ ;  $\mathbf{p}_f$  – вектор значений для фона;  $\mathbf{K}(\mathbf{p}_{mn}, \mathbf{p}_f)$  – числовой положительный вектор функция для формализации критерия отнесения исследуемой точки к оптической неоднородности;  $\mathbf{K}_{\text{lim}}$  – вектор предельных значение для критерия.

Наиболее просто критерий формализуется для полутоновых изображений

$$\mathbf{K}(\mathbf{p}_{mn}, \mathbf{p}_f) = |f_{mn} - f_f| > \mathbf{K}_{\text{lim}} = \Delta f, \quad (8.1)$$

здесь  $\Delta f$  – число градаций серого для отличия яркости оптической неоднородности и яркости фона.

Для цветных изображений формализация критерия описывается следующим соотношением

$$\mathbf{K}(\mathbf{p}_{mn}, \mathbf{p}_f) = \begin{cases} |r_{mn} - r_f| > r_{\text{lim}} = \Delta r \\ |g_{mn} - g_f| > g_{\text{lim}} = \Delta g \\ |b_{mn} - b_f| > r_{\text{lim}} = \Delta b \end{cases} \quad (8.2)$$

Значения предельно возможных отклонений красного –  $\Delta r$ , жёлтого –  $\Delta g$  и голубого  $\Delta b$  могут существенно отличаться друг от друга.

*Замечание 1.* В случае применения анализируемого способа в системах управлением сложным движением оптические неоднородности – маяки [4] создаются целенаправленно, поэтому логично выбирать чистые цвета для упрощения критерия (8.2) и увеличения точности оценки искомой площади.

*Замечание 2.* Для решения задачи, указанной в замечании, проектировщики вольны в выборе формы оптической неоднородности. Поэтому использовать оптические неоднородности правильной формы – круг, квадрат и т.п. Указанные объекты являются выпуклыми, что означает, если точка  $C = (m_1, n_1) \in A$  и точка  $D = (m_2, n_2) \in A$ , то любая точка  $X = (m_3, n_3)$ , расстояние от которой до отрезка  $CD$  меньше половины физического размера пикселя также принадлежит множеству  $A$  [4].

Влияние геометрического фактора, описанного выше, на точность оценка площади по формуле (6) может оказаться существенным. В работе [4] для компенсации влияния геометрического фактора на точность оценки  $s$  следует учесть все точки изображения, которые граничат с множеством  $A$ . Их совокупность обозначим через  $FrA$ . Если для полутонового изображения точка  $(m, n) \in FrA$ , то её вклад в общую сумму

равен  $\Delta_{mn} = \frac{f_{mn} - f_f}{f_0 - f_f}$ , здесь  $f_0$  – среднее значение яркости по внутренней

области оптической неоднородности. Для цветного изображения ситуация может оказаться более сложной, но тем не менее искомый вклад  $\Delta_{mn}$  может быть оценён.

Учёт вкладов граничных элементов множества  $A$  позволяет модернизировать формулу (6) для оценки площади оптической неоднородности

$$s \approx s_{\text{pix}} \left( \sum_{(i,j) \in A} 1 + \sum_{(i,j) \in FrA} \Delta_{mn} \right). \quad (9)$$

Очевидно, что формула (9) даёт более точное по сравнению с (6) приближение площади оптической неоднородности на испытуемом объекте. Для чёрно-белого изображения условия правильности измерений площади  $s$ , то есть близости систематической погрешности измерений к нулю, сводятся к ряду ограничений: первое – число полутонов велико; второе – значение  $f_0 - f_f$  велико; третье – флуктуации яркости в пикселях изображения отсутствуют. На практике остаточная систематическая погрешность оценки (9) обуславливается малым числом полутонов, слабым контрастом оптической неоднородности и шумами в изображении.

#### *Выводы*

В статье обоснована возможность измерения площади оптической неоднородности на поверхности объекта неразрушающих испытаний на основе анализа фотоизображений. Предложен алгоритм обработки цифровых полутоновых и цветных изображений. Метод может быть применён в системах управления сложным движением перемещаемыми объектами.



## Список информационных источников

1. Садеков Р.Н. Определение дальности до объекта на основе анализа его изображений // Известия института инженерной физики, 2010. Т. 2. № 16. С. 65-67.
2. Бачевский С.В. Точность определения дальности и ориентации объекта методом пропорции в матричных телевизионных системах // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения, 2010. № 1. С. 57-66
3. Осипов, С.П., Попов, М.Ю., Федяев, Р.В., Косач, А.А. Способ определения параметров торможения лифтов и подъемников на основе анализа потока фотоизображений // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – 2011. – Вып.4 (38) . – 10 с. – <http://ipb.mos.ru/ttb>.
4. Старовойтов, Е.И., Савчук, Д.В. Использование геометрических искажений изображения, формируемого КМОП- фотоприемником, для контроля скорости сближения космических аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 2. С. 66–68.
5. Казаков Д. А., Жегалов Д. В. Использование технологий цифровой фотосъемки для изучения полей деформаций // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. – Н.Новгород: Изд-во Нижегородского ун-та. – 2007. – Вып. 69. – С. 99–105.
6. Нечаев, Е.П., Трифонов, А.П. Оценка площади пропадающего оптического изображения на фоне шумов //Автометрия. – 1987. – № 3. – С. 18–21.
7. Кондратов, В.Т., Демченко, К.А. Проблемы измерения площадей нанобъектов // Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники. – К., 2011. – С. 57–65.
8. Терехов, А.Г. Сопоставление землеустроительных и спутниковых данных IRS LISS о размерах полей в Северном Казахстане //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 5. – № 2. – С. 358–363.
9. Мигун, Н.П., Гнусин, А.Б. Тепловые воздействия при капиллярном неразрушающем контроле. – Минск : Беларус. нувука, 2014. – 131 с.