

**ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД
ОБНАРУЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ
НА ПОВЕРХНОСТЯХ ВЫСОКОГО КЛАССА ЧИСТОТЫ**

Е. В. Сысоев, И. В. Голубев, Р. В. Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,

г. Новосибирск

E-mail: evsml@mail.ru

Рассматривается метод обнаружения дефектов поверхности, основанный на анализе функции рассеяния света, применительно к задаче автоматического контроля поверхности оболочки тепловыделяющих элементов.

Введение. Повышение качества и конкурентоспособности выпускаемых изделий – одна из приоритетных задач промышленности. Это особенно актуально при производстве ответственных изделий атомной энергетики, соответствие качества которых установленным техническим требованиям определяет безопасность атомных реакторов [1]. Контроль поверхностных дефектов оболочки тепловыделяющих элементов является важной задачей повышения качества при производстве таких элементов [2].

Поиск и измерение [3] поверхностных дефектов оболочки тепловыделяющих элементов, как правило, осуществляется бесконтактными методами [4–6]. Наиболее распространенным является метод вихретока [7]. Приборы на его основе обладают высоким быстродействием, что позволяет осуществлять контроль дефектов в режиме реального времени – в темпе технологической линии потокового производства. Однако такие приборы имеют невысокую разрешающую способность и чувствительны к ориентации протяженных дефектов.

В связи с повышенными требованиями к безопасности атомных реакторов, а именно необходимости 100 %-ного контроля топливных элементов, возникает потребность в совершенствовании действующих и создании новых автоматических систем контроля внешнего вида, которые могли бы с высокой производительностью и достоверностью обнаруживать и определять положения поверхностных дефектов для последующего измерения.

Цель данной работы – показать результаты исследований метода, основанного на анализе изменения функции рассеяния света от поверхности объекта контроля, применительно к задаче автоматического обнаружения поверхностных дефектов.

Метод обнаружения дефектов основан на анализе изменений функции рассеяния света, вызванных наличием мелких повреждений контролируе-

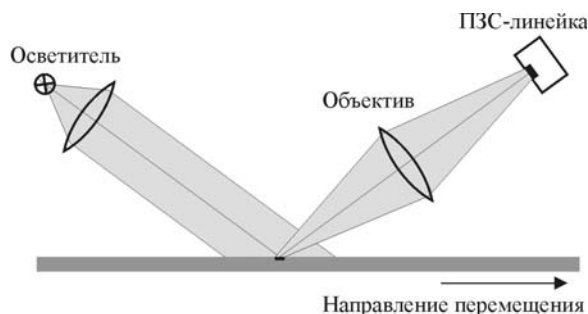


Рис. 1. Схема метода контроля

мой поверхности. Схема предложенного метода (рис. 1) включает в себя осветитель поверхности объекта контроля и фотоприемное устройство (ФПУ) (состоит из объектива и ПЗС-линейки), регистрирующее световой поток, рассеянный поверхностью.

Если поверхность имеет высокий класс чистоты, то в рассеянном свете преобладает зеркальная компонента. Наличие дефектов в зоне контроля приводит к изменению диаграммы рассеяния и уменьшению энергии в апертуре ФПУ. Анализ неравномерности регистрируемого потока позволяет сделать заключение о наличии или отсутствии дефекта в зоне контроля.

Существует ряд работ, посвященных исследованию классического рассеяния света в зависимости от статистических характеристик поверхности, в частности [8], где выполнен анализ чувствительности этого метода контроля, использующего модель плоской поверхности с дефектами для трех случаев рассеяния: диффузного, дифракционного и зеркального.

В рассматриваемой модели минимальный эффективный размер дефекта для всех трех случаев рассчитывается путем сравнения световых потоков, попадающих на элементы ПЗС-линейки при наличии или отсутствии дефекта в зоне контроля. Дефект считается зарегистрированным, если разность световых потоков приводит к разности сигналов с элементов ФПУ, превышающей отношение сигнал/шум. При расчетах предполагается, что участки исследуемой поверхности проецируются на элементы ФПУ с единичным увеличением.

Световой поток излучения Φ_0 , попадающий на элемент фотоприемника с участка контролируемой поверхности площадью S , не содержащего дефектов, без учета фоновых засветок опишем выражением [9] $\Phi_0 = R_0 S$, где R_0 [лм/м²] – светимость контролируемой поверхности.

Световой поток излучения Φ_n , регистрируемый ФПУ с такой же площадки, содержащей дефект, представим в виде

$$\Phi_n = \Phi_d + \Phi_{wd}, \quad (1)$$

где $n=1,2,3$ – номера, соответствующие рассматриваемому случаю рассеяния; Φ_d и Φ_{wd} – световые потоки излучения с поверхности дефекта и бездефектной части площадки S соответственно.

Разницу световых потоков, регистрируемых ФПУ, от бездефектной и дефектной площадок запишем как

$$\Delta\Phi_n = \Phi_0 - \Phi_n. \quad (2)$$

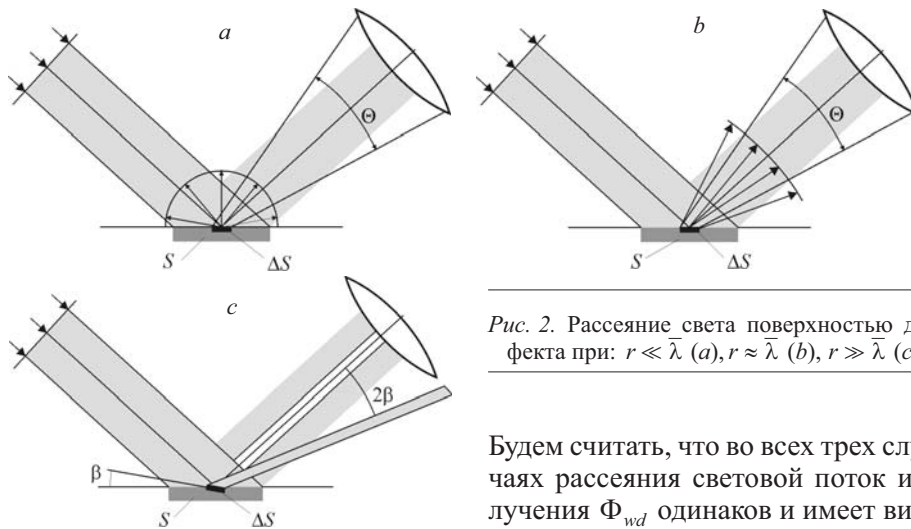


Рис. 2. Рассеяние света поверхностью дефекта при: $r \ll \bar{\lambda}$ (a), $r \approx \bar{\lambda}$ (b), $r \gg \bar{\lambda}$ (c)

Будем считать, что во всех трех случаях рассеяния световой поток излучения Φ_{wd} одинаков и имеет вид

$$\Phi_{wd} = R_0(S - \Delta S), \quad (3)$$

где $\Delta S = \pi r^2$ – площадь дефекта (r – характерный размер дефекта).

Рассмотрим случай, когда r гораздо меньше средней длины волны излучения $\bar{\lambda}$. Дефект будет диффузно рассеивать падающее на него излучение в телесный угол 2π (рис. 2, a). Введя обозначение апертурного угла $\theta = 2\arctg(D/2l)$ (D – диаметр объектива, l – расстояние от центра объектива до центра поверхности дефекта), получим

$$\Phi_d = \frac{R_0 \Delta S}{2\pi} 2\pi (1 - \cos(\theta/2)) = R_0 \Delta S (1 - \cos(\theta/2)). \quad (4)$$

Для диффузного рассеяния ($n=1$), используя (1), (3) и (4), преобразуем выражение (2) к виду

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_0 (\Delta S/S) \cos(\theta/2). \quad (5)$$

В случае, когда характерный размер дефекта по порядку величины равен средней длине волны излучения, т. е. $r \approx \bar{\lambda}$, в свете, рассеянном дефектом, будет преобладать дифракционная составляющая (рис. 2, b) и выражение для светового потока Φ_d примет следующий вид:

$$\Phi_d = R_0 \Delta S L \left(\frac{2\pi}{\bar{\lambda}} r \omega \right), \quad (6)$$

где $L\left(\frac{2\pi}{\bar{\lambda}} r \omega\right)$ – часть полной энергии в дифракционной картине, которая приходится на дифракционный угол $\omega = \sin(\theta/2)$ [10]: $L(x) = 1 - J_0^2(x) - J_1^2(x)$. Здесь J_0, J_1 – функции Бесселя 0-го и 1-го порядков соответственно.

Используя (1)–(3) и (6), получим выражение для разницы световых потоков излучения $\Delta\Phi_2$:

$$\Delta\Phi_2 = \Phi_0 \frac{\Delta S}{S} \left(1 - L\left(\frac{2\pi}{\bar{\lambda}} r \omega\right) \right).$$

Рассмотрим случай, когда характерный размер дефекта много больше средней длины волны излучения: $r \gg \lambda$. При этом условии дифракцией на границе дефекта можно пренебречь, так как ее вклад в общий световой поток незначителен.

Предположим, что дефект представляет собой участок поверхности площадью ΔS , наклоненный под углом β к бездефектной поверхности (рис. 2, *c*). Обнаружение дефекта возможно только в случае, когда угол $|\beta| \geq \beta_* \approx \theta/4$. При этом отраженный от поверхности дефекта пучок света не попадает в апертуру объектива, т. е. $\Phi_d = 0$, и выражение для светового потока $\Delta\Phi_3$ примет вид

$$\Delta\Phi_3 = \Phi_0(\Delta S/S). \quad (7)$$

Полученные выражения для трех случаев рассеяния показывают, что чем меньше апертура ФПУ, тем больше разница зарегистрированных световых потоков $\Delta\Phi_n$, излучаемых бездефектной и дефектной площадками.

Для регистрации дефекта необходимо, чтобы разница между сигналами U_0 и U_n , пропорциональными Φ_0 и Φ_n соответственно, была больше сигнала U_{dc} , вызванного темновым током фотоприемника [9], т. е. выполнялось следующее неравенство:

$$\Delta U = U_0 - U_n > U_{dc}$$

($U_0 = (Rt\Phi_0)/S$, $U_n = (Rt\Phi_n)/S$, t – время экспозиции), или

$$\Delta U = (Rt/S)\Delta\Phi_n > U_{dc}. \quad (8)$$

Пример расчета чувствительности. Для оценки обнаружительной способности был произведен расчет минимального размера дефекта, который можно зарегистрировать предлагаемым методом. Расчеты выполнялись применительно к следующим параметрам детектора (ПЗС-линейка SONY ILX511): диаметр объектива $D = 35$ мм; расстояние от центра объектива до центра дефекта $l = 100$ мм; площадь элемента ПЗС-линейки $S = 14 \times 200$ мкм; чувствительность $R = 200$ В/лк · с; напряжение насыщения $U_{sat} = 0,8$ В; темновое напряжение $U_{dc} = 3,0$ мВ; динамический диапазон $DR = U_{sat}/U_{dc} = 267$.

Предположим, что с бездефектной площадки на детектор падает такой световой поток излучения, при котором светочувствительный элемент формирует напряжение $U_0 = U_{sat}$. Тогда неравенство (8) будет иметь вид

$$\Delta\Phi_n/\Phi_0 > 1/DR. \quad (9)$$

Найдем решения неравенства для трех моделей рассеяния.

При диффузном рассеянии ($n = 1$) согласно (5) и (9) получаем

$$\Delta S > \frac{S}{DR \cos(\theta/2)},$$

где DR – динамический диапазон детектора. Так как $\Delta S = \pi r^2$, то

$$r > \sqrt{\frac{1}{\pi} \frac{S}{DR \cos(\theta/2)}}.$$

Подставив в это неравенство численные значения параметров, получим $r > 1,84$ мкм.

Для случая дифракционного рассеяния ($n=2$) решение неравенства (9) запишем следующим образом:

$$\frac{\Delta S}{S} \left(1 - L \left(\frac{2\pi}{\lambda} r \omega \right) \right) > \frac{1}{DR},$$

или

$$DR > S / \Delta S \left(1 - L \left(\frac{2\pi}{\lambda} r \omega \right) \right). \quad (10)$$

Зависимость (10) размера обнаруживаемого дефекта от динамического диапазона сигнала фотоприемника для $\lambda = 0,65$ мкм и $\omega = \sin(\theta/2) = 0,172$ представлена на рис. 3 в графическом виде. Из рисунка видно, что для выбранных параметров оптического канала регистрирующей системы размер дефекта, который может обнаружить установка, должен удовлетворять условию $r > 4,54$ мкм.

Подставив (7) в неравенство (9), запишем выражение для зеркального рассеяния ($n=3$):

$$r > \sqrt{\frac{1}{\pi} S / DR}.$$

Используя численные значения параметров, получим $r > 1,83$ мкм.

Поскольку рассеяние на дефекте имеет комплексный характер, т. е. рассмотренные три типа рассеяния в чистом виде не наблюдаются, то минимальный обнаруживаемый дефект необходимо оценивать по самому худшему случаю. Из приведенных расчетов следует, что это – дефект с характерным размером порядка среднего значения длины волны используемого излучения, т. е. в рассеянии на дефекте преобладает дифракционная компонента.

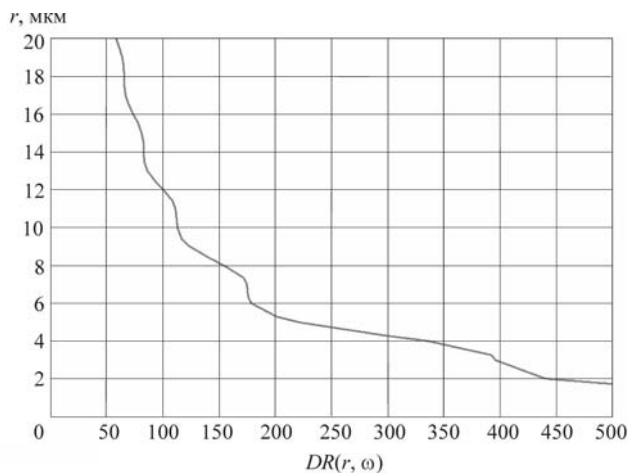


Рис. 3. Зависимость размера регистрируемого дефекта от динамического диапазона фотоприемника

Для рассмотренной регистрирующей системы минимальный размер обнаруживаемого дефекта составляет 4,7 мкм.

Результаты проведенного анализа чувствительности показывают, что предложенный метод контроля поверхности удовлетворяет современным требованиям обнаружения механических дефектов.

Заключение. В данной работе исследована чувствительность метода обнаружения дефектов поверхности, основанного на анализе функции рассеяния света для трех случаев: диффузного, дифракционного и зеркального. Минимальный размер регистрируемого дефекта составил для диффузного рассеяния 1,84 мкм, для дифракционного 4,54 мкм и для зеркального 1,83 мкм.

Таким образом, для рассмотренной регистрирующей системы минимальный размер обнаруживаемого дефекта или группы дефектов равен 4,54 мкм.

Теоретически показана возможность обнаружения механических дефектов поверхности предложенным методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **От первой в мире АЭС** – к атомной энергетике XXI века // Сб. тез. докл. и сообщений 10-й ежегод. конф. Ядерного общества России. М.: Изд-во ФЭН, 1999.
2. **Голубев И. В., Куликов Р. В., Рыбченко С. Б., Сысоев Е. В.** Система обнаружения механических дефектов и дефектов цветности поверхности оболочки ТВЭЛ // Современные проблемы геодезии и оптики: Сб. мат. ЛПМ Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск: Изд-во СГГА, 2003. Ч. 2. С. 170.
3. **Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В., Шахматов В. А.** Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // Автометрия. 2004. **40**, № 5. С. 4.
4. **Измерение.** Контроль. Качество. Неразрушающий контроль. ИПК. М.: Изд-во стандартов, 2002.
5. **Сорокин П. А., Селиверстов Г. В.** Дефектоскопия поверхности методом дисперсионного анализа // Автоматизация и современные технологии. 2001. № 8. С. 16.
6. **Селиверстов Г. В., Сорокин П. А.** Высокопроизводительный оптический метод контроля дефектов поверхности // Там же. С. 14.
7. **Федоров А. Н.** Методики и средства вихретокового контроля твэлов и их компонентов // Вопросы атомной науки и техники. М.: ВНИИ техн. физики и автоматизации, 2005. Вып. 59. Ч. 1. С. 40.
8. **Bennett J. M., Mattsson L.** Introduction to Surface Roughness and Scattering. Washington: Optical Society of America, 1989.
9. **Ишанин Г. Г., Панков Э. Д., Андреев А. Л., Польщиков Г. В.** Источники и приемники излучения. С.-Пб: Изд-во «Политехника», 1991.
10. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1970.

Поступила в редакцию 17 октября 2006 г.