

Высокоточные измерения глубины дефектов на поверхности цилиндрических промышленных изделий

И. А. Выхристюк^{1}, Е. В. Сысов¹, Р. В. Куликов¹*

¹ Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: uic@ngs.ru

Аннотация. Описан процесс измерения 3D-рельефа цилиндрической поверхности при помощи оптического интерференционного профилометра. Рассмотрено влияние формы и положения контролируемой поверхности на ошибку измерения глубины дефектов. Представлен алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс определения глубины дефекта по измеренному 3D-рельефу поверхности, использующий базовую цилиндрическую или плоскую поверхность.

Ключевые слова: глубина дефекта, профилометрия, 3D-модель поверхности, базовая поверхность

High-precision measurements of the depth of defects on the surface of cylindrical industrial products

I. A. Vykhristyuk^{1}, E. V. Sysoev¹, R. V. Kulikov¹*

¹ Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: uic@ngs.ru

Abstract. The process of measuring the 3D relief of a cylindrical surface using an optical interference profilometer is described. The influence of the shape and orientation of the controlled surface on the error in measuring the depth of defects is considered. An algorithm is presented that makes it possible to automate the process of determining the depth of a defect from a measured 3D surface relief, using a basic cylindrical or flat surface.

Keywords: defect depth, profilometry, 3D surface model, reference surface

Введение

При производстве ядерного топлива к чистоте поверхности изделий, эксплуатируемых в условиях агрессивных сред, предъявляются высокие требования. Например, на оболочках тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), используемых в ядерных реакторах типа ВВЭР, наличие дефектов глубиной 50 мкм и более является недопустимым [1]. Такие оболочки представляют собой металлические трубы, длиной несколько метров и диаметром около 10 мм. Так как подобные изделия являются дорогостоящими, требуется производить измерения глубины дефектов с высокой точностью, чтобы избежать перебраковки годной продукции.

Частично задачу поиска дефектов на трубах решают приборы, работающие с использованием ультразвуковых [2] и вихретоковых [3, 4] методов, но такие способы контроля неудовлетворительно работают с точечными или узкими продольными дефектами.

Для более точных измерений в целях арбитражного контроля или в исследовательских целях глубину дефектов измеряют профилометрами. Оптическая интерференционная профилометрия позволяет производить бесконтактные измерения трехмерного профиля поверхности с субмикронной разрешающей способностью. На базе этой технологии в КТИ НП СО РАН разработан ряд приборов [5–8], применяющихся, в том числе, и для измерения глубины дефектов на поверхности оболочек твэлов [5].

При определении глубины дефекта по облаку точек существуют трудности, связанные с неортогональностью оси сканирования профилометра и измеряемой поверхности. В представленной работе описан способ определения глубины дефектов по облаку трехмерных точек, описывающих измеренный 3D-рельеф фрагмента поверхности цилиндрического изделия с использованием базовой поверхности.

Измерение рельефа поверхности

В оптической интерференционной профилометрии измерение рельефа поверхности основано на регистрации фазы интерференционного сигнала [9]. При использовании низкокогерентных источников света интерференция будет наблюдаться лишь в узком слое, толщина которого равна длине когерентности l_c (от единиц до нескольких десятков микрон).

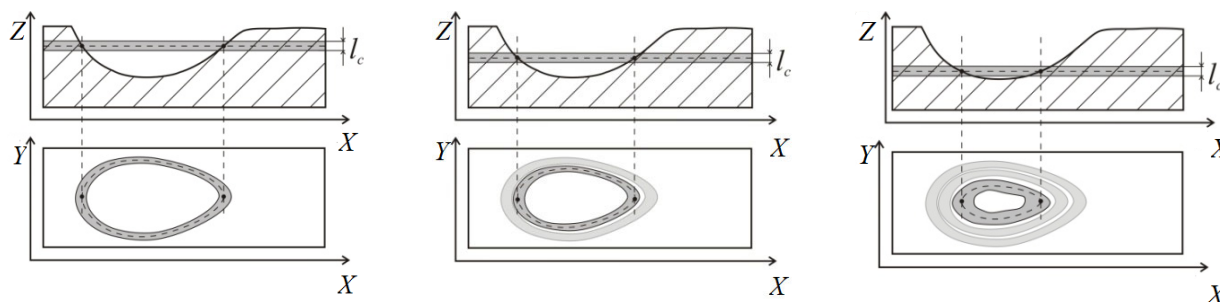


Рис. 1. Измерение рельефа поверхности низкокогерентным интерферометром:

Z – ось сканирования (изображения слева направо соответствуют последовательным шагам сканирования в направлении по Z сверху вниз), X , Y – горизонтальная и вертикальная оси в фиксируемом изображении.

Сканируя этим слоем измеряемую поверхность, и определяя на снимках камеры места пересечения поверхности и слоя, можно построить рельеф поверхности (рис. 1). В приборах [5] для измерения рельефа поверхности используется метод дифференциальных интерферограмм [10].

В результате измерения для каждого пикселя (X, Y) , где X и Y – номера позиции пикселя в фотодетектирующей матрице по горизонтали и вертикали, соответственно, определяется координата сканирования $Z(X, Y)$, на которой произошло пересечение фрагмента измеряемой поверхности, соответствующего этому пикселю, и слоя когерентности. В случае, если интерференционный сигнал в пикселе не зарегистрирован, $Z(X, Y)$ принимает некоторое особое значение, обозначающее этот факт. Такая точка в дальнейших действиях не используется.

Проблемы определения глубины дефекта

При определении глубины дефекта по облаку трехмерных точек $Z(X, Y)$ можно пользоваться только координатой сканирования, если поверхность плоская и плоскость эта строго перпендикулярна оси сканирования. На практике добиться перпендикулярности оси сканирования и измеряемой поверхности бывает трудно.

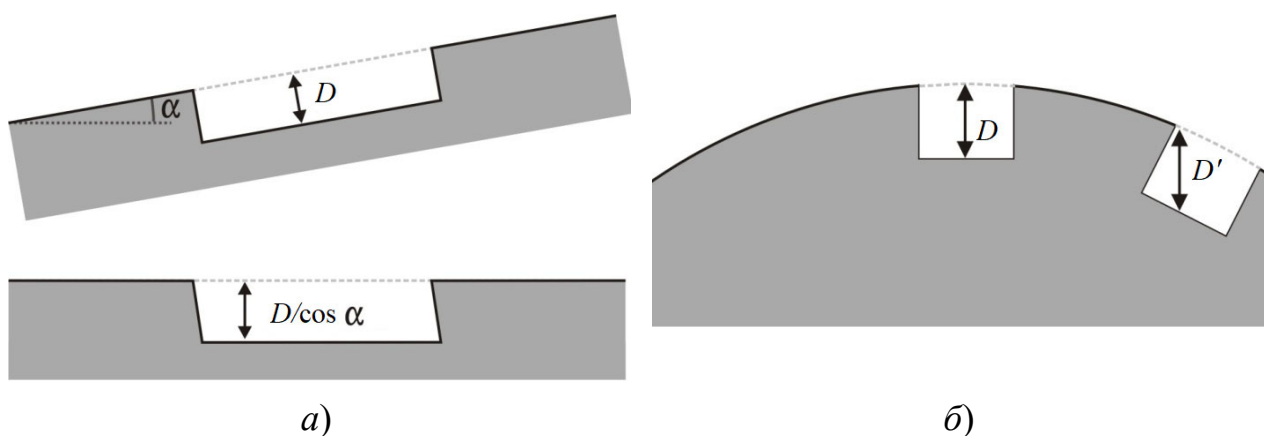


Рис. 2. Ошибки определения глубины дефекта, вызванные наклоном и цилиндричностью измеряемой поверхности:

а) вычитание наклонной плоскости приводит к увеличению глубины; б) неортогональность оси Z (вертикаль) к поверхности приводит к неправильному определению глубины

При малых углах наклона можно произвести операцию вычитания из координат $Z(X, Y)$ значений $Z_p(X, Y)$, описывающих плоскость, аппроксимирующую измеренную поверхность. Ошибка определения глубины дефекта при этом будет составлять:

$$D \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right), \quad (1)$$

где D – глубина дефекта, α – угол наклона (рис. 2, а). Таким образом, при глубине дефекта 50 мкм ошибка в 1 мкм возникнет при величине угла α около 11 градусов.

Неплоскостность контролируемой поверхности создает дополнительные трудности при определении глубины дефекта и служит потенциальным источником увеличения ошибки измерения.

Для определения глубины дефекта на цилиндрической поверхности можно вначале устранить наклон оси цилиндра к горизонтальной плоскости, затем построить сечение получившейся поверхности вертикальной плоскостью, содержащей дефект. Так как реальные дефекты имеют неровное дно, и угадать при измерении и построении сечения, где находится самое глубокое место невозможно, могут возникать дополнительные ошибки, связанные с тем, что:

- а) сечение строится в плоскости, не ортогональной поверхности (рис. 2, б);
- б) сечение строится не для самого глубокого места.

Построение базовой поверхности

Для устранения описанных выше ошибок предложено аппроксимировать измеренную поверхность цилиндром, построить карту отклонений точек от цилиндрической поверхности и глубиной дефекта считать максимальную величину отклонения.

Для работы с базовой поверхностью (далее – БП) перейдем в трехмерное пространство (x,y,z) , где все оси будут иметь одинаковый масштаб. При этом облако точек $Z(X,Y)$ преобразуется в (kX,kY,Z) , где k – коэффициент преобразования, равный величине размера проекции пикселя в зону измерения в масштабе координаты сканирования.

Базовую цилиндрическую поверхность опишем следующими параметрами: (p_x,p_y,p_z) – точка, лежащая на оси цилиндра, (v_x,v_y,v_z) – единичный вектор, параллельный оси цилиндра, R – радиус цилиндра.

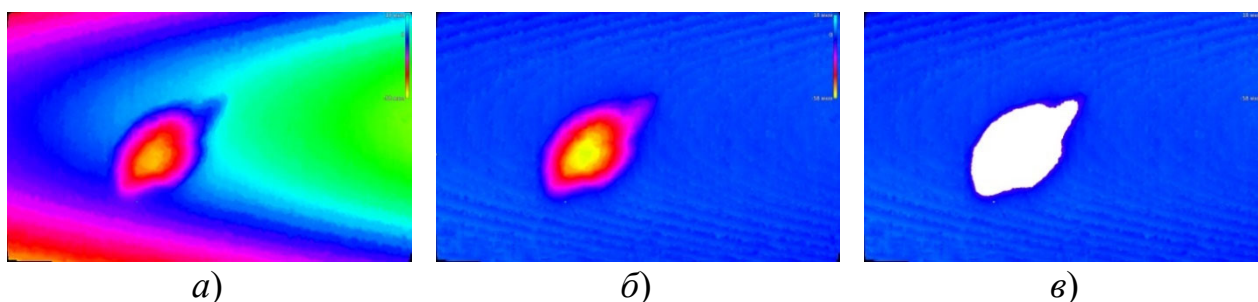


Рис. 3. Карты измеренной наклонной цилиндрической поверхности с дефектом типа «накол» глубиной 57,3 мкм и диаметром 0,78 мм:

- а) цвет соответствует $Z(X,Y)$; б) цвет соответствует $D(X,Y)$; в) цвет соответствует $D(X,Y)$, белым обозначена маска дефекта

Аппроксимация БП может производиться различными итерационными методами. Основной задачей является минимизация среднеквадратичного отклоне-

ния измеренного облака точек от БП. Отклонение точки, соответствующей пикселю (X, Y) , от БП (рис. 3) вычисляется по следующему выражению:

$$D(X, Y) = R - \left| \left(kX - p_x, kY - p_y, Z - p_z \right) \times \left(v_x, v_y, v_z \right) \right|,$$

то есть, если точка находится на поверхности цилиндра, отклонение будет равно нулю, положительное значение говорит о том, что точка лежит внутри цилиндра, отрицательное – снаружи. Модуль векторного произведения соответствует расстоянию от точки (kX, kY, Z) до оси цилиндра, а вычитая это расстояние из радиуса цилиндра, получаем отклонение от цилиндра с положительным направлением к центру.

Так как большие по площади и глубине дефекты могут оказать влияние на аппроксимацию БП, можно в процессе аппроксимации на некоторых итерациях строить маску дефектов (определять точки, для которых модуль отклонения превышает заданный порог) и дальнейшие вычисления среднеквадратичного отклонения производить только для точек вне этой маски (рис. 3, б). Порог нужно сначала задавать большой, а затем уменьшать. Таким образом, в конце аппроксимации вне маски останутся только точки, принадлежащие цилиндрической поверхности без дефектов.

Для дефектов на плоских поверхностях, чтобы избежать ошибки (1), нужно использовать БП, заданную плоскостью. Параметрами такой БП будут a, b, c, d – коэффициенты уравнения плоскости, а отклонение рассчитывается следующим образом:

$$D(X, Y) = akX + bkY + cZ + d.$$

Заключение

Представленный способ определения глубины дефекта по максимуму (среди всех измеренных точек) отклонения от базовой поверхности обладает следующими преимуществами:

- 1) позволяет избежать ошибок, связанных с наклонами и формой измеряемой поверхности;
- 2) позволяет автоматически обнаруживать самое глубокое место дефекта;
- 3) подходит для плоских и цилиндрических поверхностей;
- 4) может быть расширен на другие типы поверхностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карлов Ю.К., Кулешов В.К. Комплексный контроль дефектов внешнего вида твэлов ВВЭР-1000 // Приборы. – 2013. – № 10. – С. 21–25.
2. Лубнин, М. Ю. Об акустических характеристиках продольных искусственных отражателей, используемых при ультразвуковой дефектоскопии труб / М. Ю. Лубнин, П. А. Сенюткин // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 11-17.

3. Федоров А.Н. Методики и средства вихретокового контроля твэлов и их компонентов // Вопросы атомной науки и техники, сер. Техническая физика и автоматизация, 2005. № 59. Ч. 1. С. 40-44.
4. Семеренко А.В., Чащин С.Б., Норченко Ю.Г., Марченко В.Г. Автоматизированная вихретоковая система ELO 3Т для контроля оболочек твэлов // Территория NDT. 2016. № 3. с. 32-34.
5. 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. – № 4. – с. 4.
6. Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Поташников А.К., Разум В.А., Степнов Л.М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. 2010. 46, № 2. С. 119–128.
7. Sysoev E., Kosolobov S., Kulikov R., Latyshev A., Sitnikov S., Vykhristyuk I. Interferometric Surface Relief Measurements with Subnano/Picometer Height Resolution. Measurement Science Review. 2017; 17(5): 213–218. DOI: 10.1515/msr-2017-0025
8. Автоматический контроль качества поверхности труб (оболочек) / Е. В. Власов, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов [и др.] // Приборы. – 2020. – № 12(246). – С. 30-37.
9. Chugui Y., Verkhoglyad A., Zavyalov P., Sysoev E., Kulikov R., Vykhristyuk I., Zavyalova M., Poleshchuk A., Korolkov V. Optical Measuring and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications. International Journal of Automation Technology. 2015; 9(5): 515–524. DOI: 10.20965/ijat.2015.p0515
10. Автоматизированная система контроля качества поверхности / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов [и др.] // Приборы. – 2014. – № 12(174). – С. 31-37.

© И. А. Выхристюк, Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, 2022