

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 555.411

Е. В. Сысоев, И. В. Голубев, Ю. В. Чугуй, В. А. Шахматов

(Новосибирск)

**ИЗМЕРЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ОТКЛОНЕНИЙ
ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ
НА ОСНОВЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ
ЧАСТИЧНО КОГЕРЕНТНОГО СВЕТА**

Рассмотрен оптико-электронный метод измерения профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света. Разработана промышленная система измерения дефектов поверхности. Приведены блок-схема и технические характеристики системы. Предложен метод оценки глубины профиля поверхности с использованием полизональной интерференции частично когерентного света. Приведены результаты экспериментальной проверки метода.

Введение. Разработка оптико-электронных систем для бесконтактных измерений профиля поверхностей является актуальной задачей. Как правило, для высокоточных измерений профиля применяются методы и устройства, использующие интерференцию световых волн [1].

Для измерения профиля поверхностей, имеющих большие локальные перепады, применяются измерительные устройства, работа которых основана на методах низкокогерентной интерферометрии [2]. В этом случае источники световых волн имеют малую длину когерентности – порядка нескольких длин волн.

В предлагаемой работе рассматривается метод измерения профиля поверхности с использованием дифференциальных интерферограмм, получаемых по набору первичных интерферограмм со сдвигом фазы. Представлена промышленная оптико-электронная система измерения профиля поверхности, в которой дифференциальные интерферограммы формируются по четному числу первичных интерферограмм со сдвигом фазы на π . Такое решение дает хорошие результаты при измерении профиля поверхностей с большим динамическим диапазоном рассеивания.

Существует ряд задач, в которых нет необходимости измерять полностью профиль поверхности, а достаточно оценить величину его локального

отклонения. Такая ситуация имеет место при дефектоскопии поверхностей ответственных промышленных изделий, например при измерении глубины дефектов на поверхности металлической оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для атомных электростанций. В этом случае критичной является глубина дефекта. Так как общая площадь всей поверхности ТВЭЛ, содержащей дефекты, может быть достаточно большой, то для ее оценки требуется высокая скорость измерений.

Для решения этой задачи в данной работе предлагается метод, названный полизональной интерференцией. Использование этого метода позволяет проводить оценку глубины дефекта на основе одной дифференциальной интерферограммы, т. е. отказаться от сканирования по глубине, необходимого для восстановления полного профиля.

Принцип измерения профиля поверхности, основанный на явлении интерференции при освещении полихроматическим источником света, поясним с помощью рис. 1, *a*. Измеряемая поверхность помещается в одно из плеч интерферометра Майкельсона, а в другое – эталонная поверхность. Коллимированный пучок частично когерентного света, выходящий из осветителя, с помощью светоделителя расщепляется на две части. Одна часть пучка попадает в опорное плечо и освещает эталонный объект, а вторая часть пучка попадает на измеряемую поверхность.

Волны, отраженные от эталонного объекта и измеряемой поверхности, интерферируют в плоскости ПЗС-камеры. Условие существования интерференции определяет слой в зоне измерения, толщина которого приблизительно равна длине когерентности (рис. 1, *b*). Средняя часть этого слоя совпадает с проекцией эталонной поверхности в зону измерения. Для непрозрачных, например металлических, объектов положение и конфигурация зоны интерференции на ПЗС-матрице будет определяться пересечением проекций эталонной и измеряемой поверхностей, образуя изолинию дефекта, соответствующую данной глубине вдоль оси *Z*. Регистрация этих зон ПЗС-камерой позволяет восстановить изолинию.

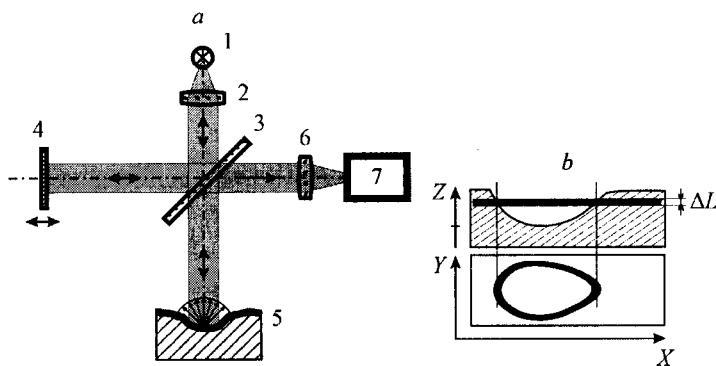


Рис. 1. Принцип измерения профиля поверхности: оптическая схема (1 – источник частично когерентного света, 2 – коллиматор, 3 – светоделительное зеркало, 4 – зеркало опорного плеча, 5 – измеряемая поверхность, 6 – объектив, 7 – ПЗС-камера) (*a*): слой, в зоне измерения которого выполняется условие существования интерференции, регистрируемой ПЗС-камерой, ΔL – толщина слоя по глубине (*b*)

Для полихроматического излучения длина когерентности, как известно, находится по формуле

$$l_{\text{ког}} = \frac{\bar{\lambda}^2}{2\Delta\lambda}, \quad (1)$$

где $\bar{\lambda}$ – средняя длина волны, а $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника. Очевидно, чем меньше длина когерентности $l_{\text{ког}}$, тем точнее можно локализовать зоны интерференции. Из формулы (1) видно, что предпочтителен тепловой источник света, имеющий широкий спектр излучения. Так, для лампы накаливания расчет длины когерентности (с учетом спектральной чувствительности ПЗС-камеры) дает следующее значение: $l_{\text{ког}} \approx 3$ мкм. Это означает, что зона интерференции вдоль оси Z будет локализована в слое $\Delta Z \approx 3$ мкм. При этом погрешность измерения профиля определяется погрешностью фиксации зон интерференции. Она зависит не только от $l_{\text{ког}}$, но и от способов регистрации этих зон.

При этом необходимо учитывать пространственную когерентность [3], значение которой определяется из соотношения

$$\rho = 0,16\bar{\lambda}/\alpha, \quad (2)$$

где α – угловой радиус источника света в пространстве изображения (в данном случае в плоскости ПЗС-матрицы). Формула (2) определяет допустимое поперечное рассогласование интерферирующих волн от сопряженных точек обоих плеч интерферометра, что накладывает ряд ограничений на реализацию конкретного схемотехнического решения для регистрации интерференции.

Выделение зон интерференции производится следующим образом. Эталонный объект перемещается на дробную часть средней длины волны вдоль оптической оси. Для каждого положения эталонного объекта регистрируются интерферограммы, которые затем используются при расчете и локализации зон интерференции. Результирующий сигнал $I(x, y)$ в каждой точке наблюдения рассчитывается следующим образом:

$$I(x, y) = \sum_{j=1}^n A_j [I_j^0(x, y) + I_j(x, y)], \quad (3)$$

где координата (x, y) определяет конкретную точку наблюдения в зоне измерения (или соответствующий элемент на ПЗС-матрице); индекс j – номер интерферограммы; n – число интерферограмм; $I_j^0(x, y)$ – среднее значение интенсивности в соответствующей точке наблюдения (x, y) в j -й интерферограмме; $I_j(x, y)$ – интерференционный член, значение которого определяется интерференцией волн от эталонного объекта и измеряемой поверхности; A_j – весовой коэффициент.

В простейшем случае, когда используются две интерферограммы ($n = 2$) с фазовым сдвигом на угол π , можно положить $A_1 = 1$, $A_2 = -1$. Так как интерферограммы получены в одном и том же канале регистрации, то с высокой точностью выполняется условие $I_1^0(x, y) = I_2^0(x, y)$. Интерференционные члены в интенсивностях $I_1(x, y)$, $I_2(x, y)$ отличны от нуля только в пределах

длины когерентности $l_{\text{ког}}$. В результате для сигнала $I(x, y)$ согласно (3) получаем следующее выражение:

$$I(x, y) = I_1(x, y) - I_2(x, y). \quad (4a)$$

Таким образом, в полученной дифференциальной интерферограмме полностью устранено среднее значение интенсивности. Существенно, что сдвиг по фазе на величину π приводит к изменению знака интерференционного члена, т. е. $I_2(x, y) \sim -I_1(x, y)$, что позволяет получить удвоенное значение интенсивности

$$I(x, y) \sim 2I_1(x, y). \quad (4б)$$

Это обстоятельство является важным особенно в тех случаях, когда динамический диапазон рассеивающей способности измеряемой поверхности велик. Результирующий сигнал $I(x, y)$ отличен от нуля только в тех зонах, где выполнено условие интерференции. Дальнейшая обработка $I(x, y)$ позволяет восстановить изолинию уровня профиля измеряемой поверхности.

Для восстановления профиля всей поверхности в зоне измерения проводится сканирование объекта по глубине с определенным шагом путем изменения взаимного расположения измеряемой поверхности и блока интерферометра. При этом изменяется взаимное расположение слоя существования интерференции и поверхности объекта, т. е. регистрируются изолинии поверхности, соответствующие другим значениям глубины вдоль оси Z . По набору полученных изолиний восстанавливается полный профиль измеряемой поверхности, т. е. ее трехмерная структура, анализ которой позволяет определить, в частности, ее поперечные (оси X, Y) и продольные (ось Z) параметры, включая такой характерный параметр, как глубина.

В измерительной практике встречаются задачи, когда достаточно оценить глубину трехмерной структуры. Это имеет место, например, при оценке величины дефектов поверхностей, когда устанавливаются некоторые предельные значения на допуск локального изменения профиля. Быстрая оценка значения глубины дефектов поверхностей особенно актуальна при производстве ответственных изделий на технологическом конвейере.

Для решения задачи быстрой оценки глубины профиля в данной работе использовался вместо эталонного объекта с одной отражающей поверхностью оптический блок, состоящий из двух оптических поверхностей (рис. 2).

Если в опорное плечо интерферометра вместо эталонного объекта поместить изображенный на рис. 2 оптический блок, состоящий из двух стеклянных пластин со светоотражающим покрытием (коэффициенты отражения R_1 и R_2), разнесенных на расстояние h , то отраженный свет будет представлять собой ряд волн разной интенсивности, как показано на рис. 3. Длина пройденного пути в опорном плече для каждого следующего прохода (k -й порядок отражения) в случае нормального падения будет

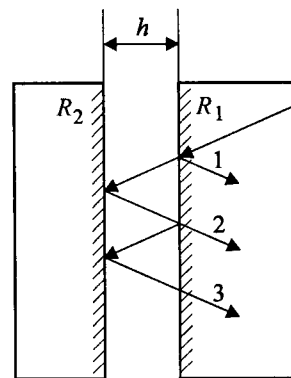


Рис. 2. Схема оптического блока опорного плеча интерферометра

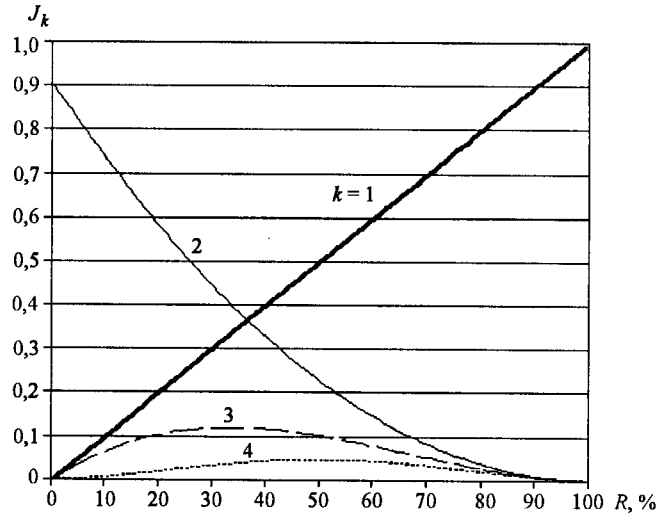


Рис. 3. Зависимость интенсивности отраженных волн от R_1 при $R_2 = 0,9$. (Интенсивности J_k первого, второго, третьего и четвертого порядков отражения ($k = 1, \dots, 4$) в зависимости от коэффициента отражения R_1)

отличаться от предыдущего на значение, равное $2h$. Если в качестве оптического блока взять плоскопараллельную пластинку из оптически прозрачного материала с коэффициентом преломления n и нанесенными на него с обеих сторон отражающими слоями, то разность оптических путей для соседних лучей разного порядка будет составлять $2hn$.

В области измерения каждому порядку отраженных волн будет соответствовать слой, для которого выполняется условие интерференции. На ПЗС-матрице регистрируются зоны интерференции, соответствующие каждому порядку отраженных волн – полизональная интерференция. Их положение определяется условием равенства длин оптических путей опорного и измерительного плеч интерферометра, т. е. будут наблюдаться несколько зон интерференции, соответствующих различным изолиниям измеряемого объекта. При этом амплитуда опорных волн разных порядков будет различной в зависимости от коэффициентов отражения оптического блока (см. рис. 3).

На рис. 4 показаны области в пространстве измерений, соответствующие первому и второму порядкам отраженных волн, для которых выполняется условие интерференции. Области интерференции, регистрируемые ПЗС-матрицей, представляют собой две изолинии профиля поверхности, разнесенные по глубине на величину h .

Результаты наблюдения полизональной интерференции приведены на рис. 5. В эксперименте использовалась оптическая система, имеющая размер зоны измерения в пространстве предметов $2,5 \times 2,5$ мм. В качестве осветителя использовалась галогенная лампа накаливания с длиной когерентности около 5 мкм. Наблюдения проводились на металлической поверхности с нанесенным коническим дефектом.

Оптический блок опорного плеча представляет собой две пластины с нанесенным на внутренние поверхности отражающим покрытием (коэффициенты отражения $R_1 = R_2 = 15\%$).

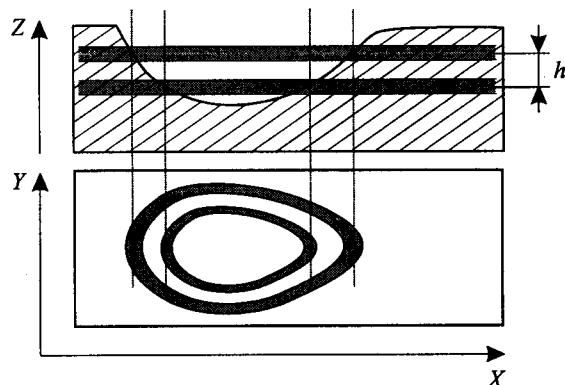


Рис. 4. Два слоя в области измерений, соответствующие двум соседним порядкам отраженных волн, для которых выполняется условие интерференции

Зоны на рис. 5 соответствуют первому и второму отраженным опорным лучам. Пересечение этих зон с поверхностью представляет собой две изолинии профиля поверхности, разнесенные по глубине на 12 мкм, что соответствует расстоянию между зеркалами оптического блока. Из-за малой амплитуды пучков третьего и последующих порядков на дифференциальных интерферограммах зоны интерференции не регистрируются.

Метод полизональной интерференции можно применять для разработки высокоскоростных систем порогового контроля глубины дефектов на поверхности ответственных изделий во многих отраслях промышленности. Он позволяет производить пороговый контроль дефектов глубиной от 5 мкм до нескольких миллиметров. При этом, как показывают оценки, погрешность контроля не превышает 2 мкм.

Система измерения глубины и профиля дефектов поверхности тепловыделяющих элементов. Объективный контроль глубины дефектов на поверхности оболочки ТВЭЛ является важной производственной задачей. Диапазон глубины дефектов может составлять от десятков до сотен микрон. При этом погрешность измерений не должна превышать 5 мкм при размере поля измерения не менее 2×2 мм, а полный диапазон перепадов измеряемой поверхности по глубине превышает 3 мм. Процесс измерения дефектов глубиной 50 мкм не должен превышать 20 с. До настоящего времени не было автоматизированных оптико-электронных измерительных систем с подобными техническими характеристиками.

В Конструкторско-технологическом институте научного приборостроения СО РАН разработана быстродействующая система «Профиль» (рис. 6) для бесконтактных высокоточных измерений дефектов на поверхности оболочки ТВЭЛ. Принцип ее действия основан на использовании интерференции частично когерентного света от



Рис. 5. Интерференционные полосы, соответствующие двум изолиниям профиля поверхности

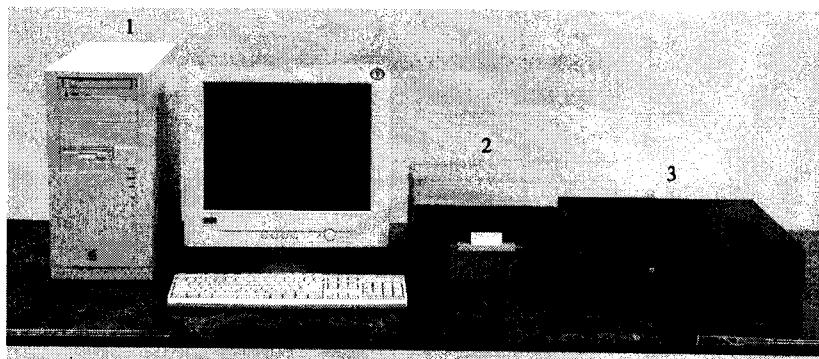


Рис. 6. Общий вид системы для измерения профиля поверхности: 1 – компьютер, 2 – оптико-механический блок, 3 – электронный блок управления

полихроматического протяженного источника и рассмотрен в данной работе. В этой системе интерферометр установлен на прецизионный однокоординатный столик. Сканирование профиля измеряемой поверхности осуществляется путем перемещения интерферометра относительно неподвижного объекта измерения. Координата положения интерферометра контролируется при помощи оптической линейки типа ПЛФ.

Система «Профиль» имеет следующие технические характеристики: зона измерения профиля поверхности $2,3 \times 2,3$ мм; диапазон измерения по глубине от 5 мкм до 10 мм; погрешность измерения глубины не более 5 мкм; разрешение по глубине 1 мкм; скорость измерения 4 сечения за 1 с.

Структурная схема системы приведена на рис. 7. Оптико-механический блок включает в себя: блок интерферометра 1, фазовый модулятор 2, осветитель 3, промышленную видеокамеру 4. Они расположены на подвижном координатном столе 5. Его перемещение осуществляется шаговым двигателем 6, контроль текущего положения осуществляется датчиком положения 7.

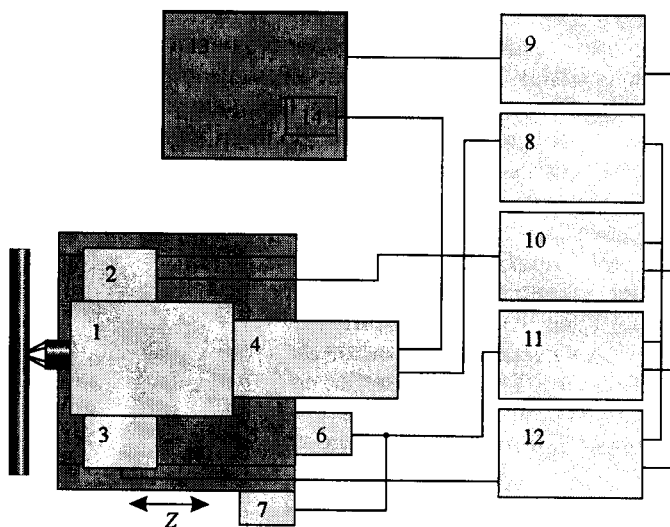


Рис. 7. Блок-схема системы для измерения профиля поверхности

Электронный блок состоит из источника питания 8, концентратора USB 9, контроллеров фазового модулятора 10, шагового двигателя 11 и осветителя 12. Управление работой системы производится компьютером 13 через интерфейс USB1.1. Ввод видеоизображений производится с помощью специализированной платы 14.

Прикладное программное обеспечение (ПО) выполняет функции интерфейса с пользователем, управления и тестирования устройства, записи результатов измерений в базу данных. ПО состоит из нескольких модулей, отвечающих за определенные режимы работы системы: измерение, просмотр результатов измерения, работа с базой данных, администрирование, проверка, тестирование, печать, а также содержит все необходимые библиотеки математических алгоритмов.

В режиме измерения ПО настраивает систему на объект измерения. При этом оператор, наблюдая в реальном времени увеличенное изображение контролируемого участка поверхности, может производить ручную или автоматическую регулировку освещенности в зоне измерения для поверхностей с различными рассеивающими свойствами. Кроме того, оператор может полуавтоматически или автоматически настраивать систему на наивысшую точку уровня измеряемой поверхности, перемещая блок интерферометра. После настройки измерение выбранного участка поверхности происходит в автоматическом режиме.

В режиме просмотра результатов измерения на экране монитора отображается трехмерная модель и карта изолиний глубины измеренного участка поверхности, на которой обозначены самая высокая и самая низкая точки поверхности. Оператор может посмотреть профиль любого выбранного сечения поверхности и определить значение перепада между любыми выбранными точками сечения.

В режиме работы с базой данных ПО позволяет записать результаты измерения в базу данных для последующего детального анализа, просмотреть информацию об измерениях, напечатать отчет.

В режиме администрирования ПО позволяет редактировать, удалять записи в базе данных, удалять и создавать новые учетные записи для пользователей системы, назначать права доступа пользователям.

В режиме тестирования ПО в автоматическом режиме проводит проверку работоспособности отдельных узлов системы и выводит результаты на экран монитора.

В режиме проверки ПО системы в полуавтоматическом режиме проверяет систему, многократно измеряя аттестованные калибры и сравнивая полученные значения с паспортными данными. Система считается готовой к работе, если ни в одном из измерений расхождение с паспортными данными калибра не превысит заданное значение погрешности.

В режиме печати выводится отчет о проведенном измерении (дата, время измерения, измеренная глубина дефекта, имя оператора) с отображением трехмерного профиля измеренного дефекта.

На рис. 8 показан измеренный профиль с дефектом типа «риск» глубиной 85 мкм и углом раскрытия 38°. На рис. 9 изображен профиль следа бойка на капсуле патрона. Глубина вмятины составляет около 1,34 мм.

Система «Профиль» разработана по заказу Российского министерства атомной промышленности для измерения профиля и глубины дефектов поверхности тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. Она сертифици-

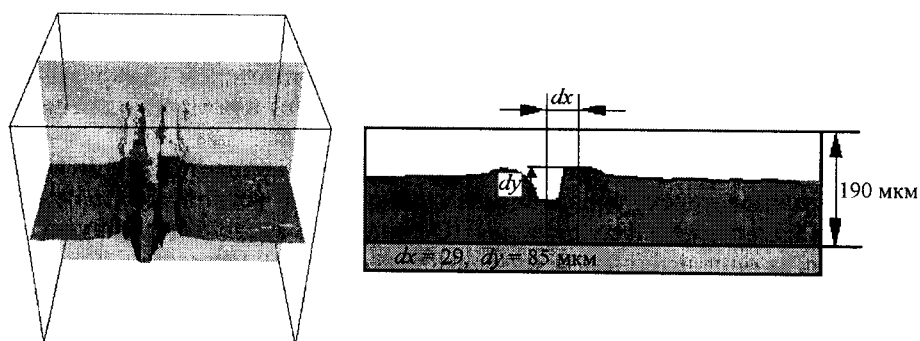


Рис. 8. Трехмерное представление дефекта типа «риск». Зона измерения $0,43 \times 0,43$ мм

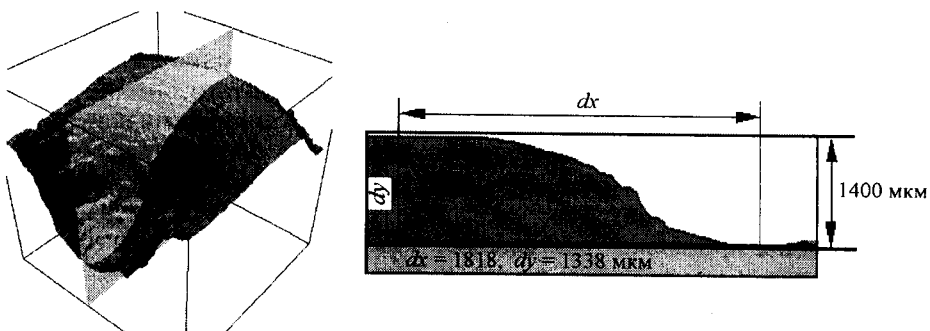


Рис. 9. Трехмерное представление следа боя на капсюле патрона. Зона измерения $2,3 \times 2,3$ мм

цирована как тип средств измерения, успешно прошла испытания в промышленных условиях и находится в промышленной эксплуатации.

Система может применяться для решения широкого круга задач размерного контроля и контроля качества, в которых требуется высокоточное и достоверное измерение профиля поверхностей.

Заключение. В работе рассматривается измерение профиля поверхности с использованием интерференции частично когерентного света. Суть метода заключается в регистрации зон интерференции света, рассеянного опорной и контролируемой поверхностями, которые представляют собой изолинию глубины контролируемой поверхности. Дифференциальные интерферограммы получаются при модуляции опорного плеча интерферометра на четверть средней длины волны. Такое решение дает хорошие результаты при измерении профиля поверхностей широкого класса, имеющих большой динамический диапазон рассеивающей способности. Сканирование по глубине позволяет получить набор изолиний глубины поверхности и восстановить ее профиль.

На основе данного метода разработана и создана опико-электронная система «Профиль» для бесконтактного измерения глубины дефектов на поверхности ТВЭЛ.

Предложен новый метод полизональной интерференции частично когерентного света для оценки глубины профиля поверхности по одной дифференциальной интерферограмме. Он позволяет проектировать быстродействующие опико-электронные системы для контроля глубины профиля по-

верхности. Сущность метода заключается в формировании набора плоскостей равной фазы, разнесенных на заранее известную величину. Пересечение проекции этих плоскостей в зоне измерения с профилем поверхности дает набор изолиний искомого профиля, которые регистрируются в виде зон интерференции. Эффективность предложенного способа подтверждена экспериментальной оценкой глубины дефекта на металлической поверхности ТВЭЛ.

Предлагаемые методы измерений и контроля трехмерного профиля поверхности могут быть широко применены при разработке измерительных систем, предназначенных как для точного измерения профиля, так и для порогового измерения глубины дефектов, возникающих, например, в процессе изготовления ответственных изделий во многих отраслях промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Leopold J., Günther H., Leopold R.** Metrology based surface quality control // Proc. of 6th ISMQC Symp., WIEN. 1998. P. 401.
2. **Dresel Th., Häusler G., Venzke H.** Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar // Appl. Opt. 1992. **31**, N 7. P. 919.
3. **Борн М.** Основы оптики. М.: Наука, 1970.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: chugui@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
3 августа 2004 г.*