

## **АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ВНЕШНЕГО ВИДА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ**

***Игнат Александрович Выхристюк***

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, старший научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

***Родион Владимирович Куликов***

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Представлена разработанная в КТИ НП СО РАН система автоматического контроля внешнего вида оболочек твэлов. Рассматриваются состав системы, используемые методы и процесс контроля. Приводятся технические характеристики системы.

**Ключевые слова:** контроль качества поверхности, обнаружение дефектов поверхности, интерференционная профилометрия, автоматическое измерение

## **AUTOMATIC APPEARANCE INSPECTION OF THE FUEL ELEMENT SHELLS**

***Ignat A. Vykhristyuk***

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Senior Researcher, phon: (383) 306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

***Rodion V. Kulikov***

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering, SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Researcher, phon: (383) 306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

The system of automatic appearance inspection of the fuel element shells surface is presented. The system structure, the measurement methods in use and the inspection process are considered. The performance specification of the system is given.

**Keywords:** surface quality inspection, surface defects detection, white-light profilometry, automatic measurement

### ***Введение***

Контроль качества оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) является важной стадией процесса производства топлива для атомных реакторов [1]. Последним этапом контроля является контроль внешнего вида, включающий в себя выявление загрязнений, таких как жировые отпечатки и пыль, дефектов цветности и механических дефектов недопустимой глубины.

Среди основных типов дефектов различают наколы, вмятины, царапины, риски, сдиры, растравы и потертости. Дефекты типа накол, царапина и риска являются допустимыми, если их глубина не превышает 30 мкм.

Для автоматического контроля некоторых типов дефектов оболочек используются токовихревые [2] и ультразвуковые методы контроля [3]. Окончательный контроль внешнего вида изделий выполняется сотрудниками подразделений технического контроля, которые при помощи визуального осмотра под специальным освещением выполняют поиск участков поверхности с возможными дефектами. Выявленные дефекты, не имеющие глубины в качестве браковочного признака, разбраковываются путем сравнения с контрольными образцами допустимых дефектов. Если дефект относится к типу, контролируемому по глубине, то значение глубины измеряется высокоточной системой измерения профиля поверхности, например [4-6]. Далее, по результатам измерений, с учетом технических условий и величины неопределенности измерения, принимается решение о разбраковке изделия.

В данной работе приводится описание и технические характеристики системы, обеспечивающей автоматическое обнаружение и измерение дефектов на внешней поверхности оболочек твэлов.

### *Общее описание работы системы*

Представляемая система состоит из двух основных частей – пост контроля внешнего вида и пост измерения глубины. На рис. 1 показано схематичное изображение системы. Стрелками обозначено направление перемещения контролируемой оболочки.

Пост контроля внешнего вида осуществляет обнаружение и классификацию дефектов внешнего вида поверхности при движении оболочки твэла сквозь него на скорости до 166 мм/с.

Пост измерения глубины выполняет измерение рельефа поверхности оболочки в области дефектов, выявленных постом контроля внешнего вида. По измеренному рельефу определяется глубина дефекта, величина которой сравнивается с пороговым значением для определения результата контроля.

При проведении контроля транспортная система помещает оболочку на вход поста контроля внешнего вида. По мере перемещения вдоль своей оси, оболочка проходит через блок видеоконтроля. После прохождения оболочки, пост контроля внешнего вида выдает результат «Годен», «Брак» или «Условный брак». В случае результата «Брак» или «Годен» оболочка помещается в первый накопитель брака или первый накопитель годной продукции, соответственно. Результат «Условный брак» приводит к перемещению оболочки на пост измерения глубины. Далее, пост контроля внешнего вида готов выполнять контроль следующей оболочки.

После выполнения измерений всех дефектов помеченных, как «Условный брак», пост измерения глубины выдает результат «Годен» или «Брак» и помещает оболочку во второй накопитель брака или второй накопитель годной продукции, соответственно.

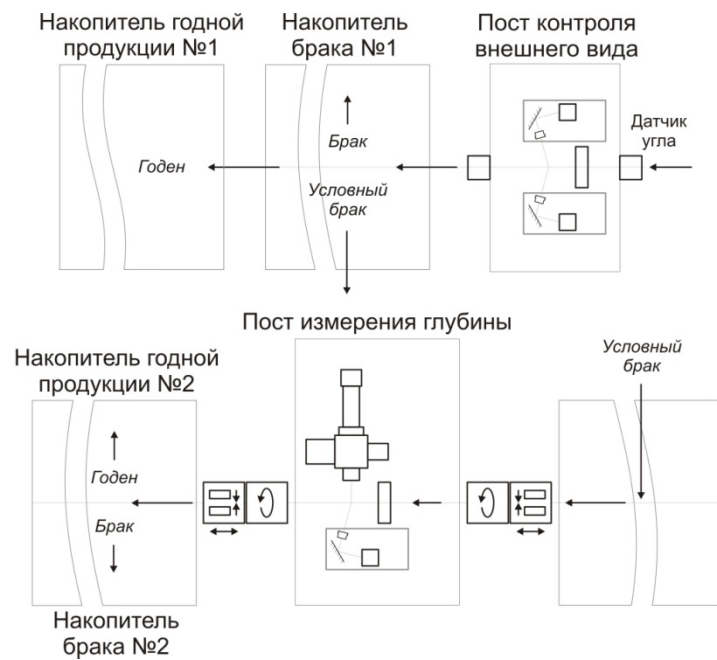


Рис. 1. Схематичное изображение системы контроля внешнего вида оболочек твэлов

### ***Видеоконтроль***

Для обнаружения и классификации дефектов внешней поверхности оболочек твэлов применяется нейросетевой алгоритм [7], анализирующий микрофотографии поверхности оболочки, зарегистрированные при прохождении изделия через блок видеоконтроля (рис. 2).

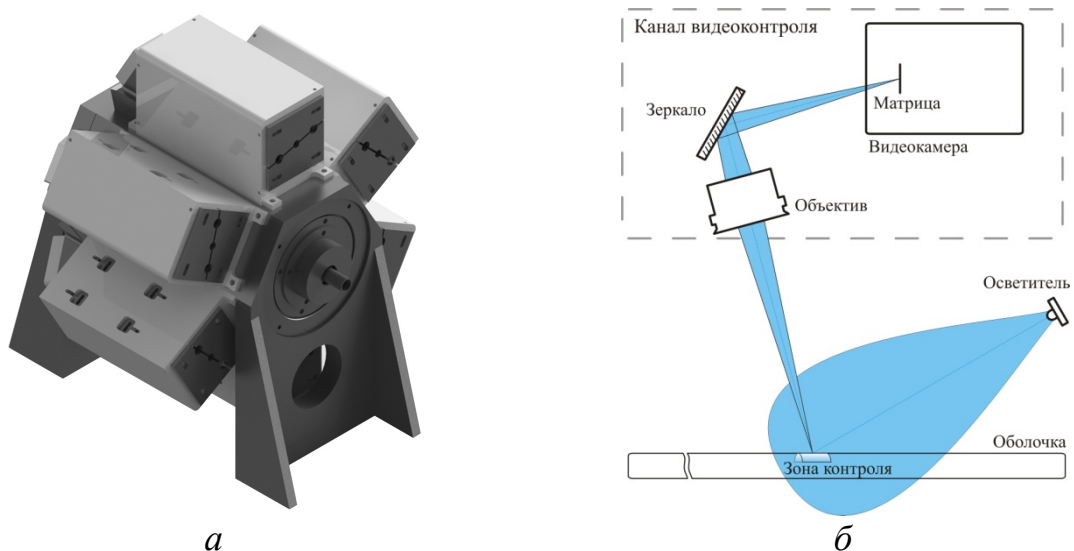


Рис. 2. Блок видеоконтроля:  
*а* – 3D модель блока, *б* – схематическое изображение канала

Шесть каналов видеоконтроля осуществляют синхронную регистрацию изображения участка поверхности оболочки, длиной 7 мм. Соседние каналы имеют перекрытие более 1,5 мм по окружности оболочки, что позволяет надежно обнаруживать дефекты, вне зависимости от их расположения в кадре. Регистрация кадров осуществляется видеокамерами синхронно со вспышкой кольцевого осветителя, обеспечивающего равномерную мощную (длительность экспозиции 0,25 мс) подсветку поверхности оболочки.

Синхронизацию подсветки и экспозиции осуществляет блок электроники, контролирующей прохождение оболочки сквозь блок видеоконтроля при помощи двух датчиков угла, присоединенных к валам колес транспортной линии на входе и на выходе из блока видеоконтроля. Один синхроимпульс генерируется на каждые 5,5 мм оболочки, что гарантирует перекрытие кадров на 1,5 мм по длине изделия.

Нейросетевой алгоритм, применяемый для обнаружения дефектов, использует предварительно обученную искусственную нейронную сеть [7]. Для обучения нейросети создана база данных изображений допустимых и недопустимых дефектов разных типов (рис. 3).

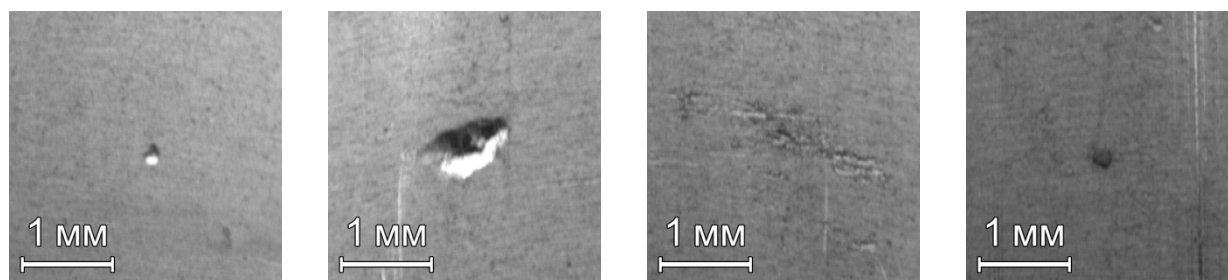


Рис. 3. Фрагменты изображений поверхности оболочек с дефектами: накол, вмятина, растрав, микровыступ

Обнаружение дефектов производится в следующем порядке:

1. Кадр, полученный от видеокамеры, помещается в видеопамять и нормализуется (яркость преобразуется в вещественное число от 0 до 1).

2. Производится сканирование нормализованного кадра окном, имеющим размеры входного слоя нейросети, с шагом по вертикали и горизонтали равным половине окна.

3. Выбранный окном фрагмент нормализованного изображения классифицируется нейросетью.

4. Если с вероятностью 0,98 и более класс соответствует дефекту, то:

а) если дефекты такого класса подлежат измерению глубины – оболочка планируется к разбраковке в «Условный брак» (если уже не запланирована в «Брак»);

б) если дефект относится к недопустимым – оболочка подлежит к разбраковке с заключением «Брак»;

в) если дефект не имеет рельефа и относится к допустимым, то он игнорируется.

В результате пост контроля внешнего вида выдаст одно из следующих заключений при выполнении соответствующих условий:

«Годен» – дефектов на оболочке не обнаружено;

«Брак» – оболочка содержит хотя бы один недопустимый дефект;

«Условный брак» – оболочка содержит только дефекты, бракуемые по глубине.

При необходимости измерения глубины дефектов формируется список расстояний от начала оболочки до дефектов, привязанный к номеру оболочки.

### *Измерение глубины дефектов*

С каждой оболочкой, поступающей на пост измерения глубины, связана информация о расположении участков (расстояние от начала оболочки), в которых необходимо выполнить измерение рельефа поверхности.

Измерения рельефа выполняются при помощи интерференционного профилометра (рис. 4, 1), созданного на базе микроинтерферометра Линника, с использованием метода дифференциальных интерферограмм [8].

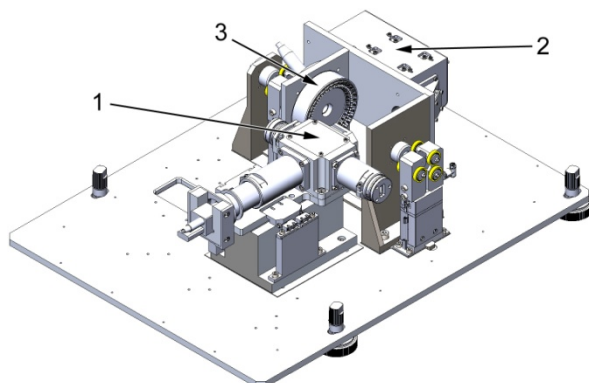


Рис. 4. Блок измерения глубины:

1 – интерференционный микроскоп, 2 – канал видеоконтроля, 3 – кольцевой осветитель

Для точного позиционирования дефекта в область измерения профилометра используются канал видеоконтроля (рис. 4, 2) и кольцевой осветитель (рис. 4, 3), аналогичные тем, которые содержит блок видеоконтроля.

Для каждой измеряемой позиции выполняются следующие действия:

1. продольное перемещение оболочки в указанную позицию;

2. вращение оболочки на 360 градусов с поиском дефектов;

3. измерение глубины всех обнаруженных дефектов.

Во время вращения оболочки кадры канала видеоконтроля регистрируются синхронно со вспышками осветителя, которые формируются через заданную ве-

личину угла поворота. По окончании кругового вращения для каждого обнаруженного дефекта выполняются следующие действия:

1. определяется его угловая и продольная координата;
2. дефект позиционируется в зону измерения (выполняется продольное перемещение и вращение);
3. производится измерение рельефа;
4. определяется максимальное отклонение рельефа от цилиндрической поверхности (глубина/высота дефекта);
5. формируется протокол измерения.

По окончании измерения всех позиций формируется общий протокол измерения и производится транспортировка оболочки на выход из поста. Если хотя бы один дефект по глубине превысил пороговое значение, оболочка поступает в брак.

Определение максимального значения высоты/глубины дефекта происходит после дополнительной обработки результатов измерения рельефа. Для этого выполняется аппроксимация облака измеренных точек  $Z(x, y)$  цилиндрической поверхностью. Далее по облаку точек  $Z(x, y)$  вычисляется  $H(x, y)$ -карта отклонений от поверхности цилиндра, соответствующая карте высот измеренной поверхности (см. рис. 5). Глубиной/высотой дефекта считается максимальное по модулю значение  $H(x, y)$ .

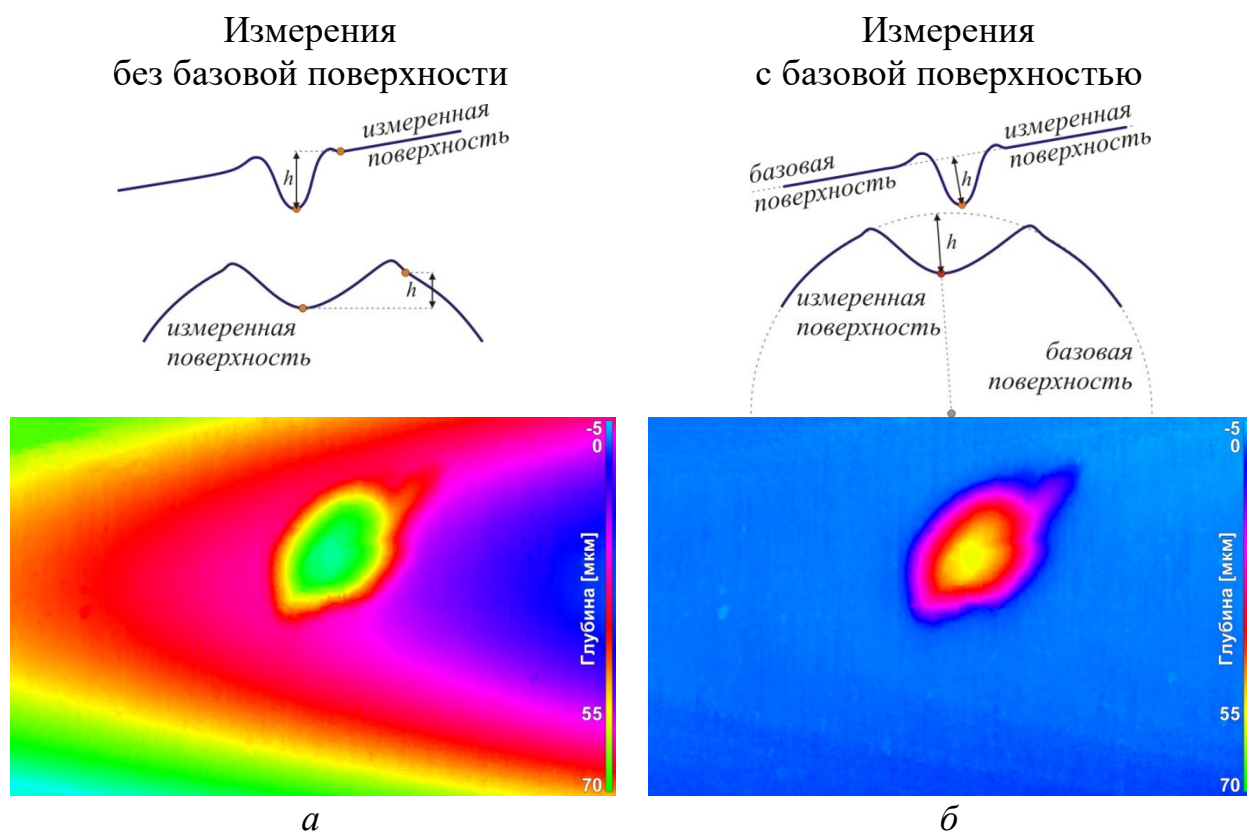


Рис. 5. Использование цилиндрической базовой поверхности при определении глубины дефекта:

$a$  – глубина определяется по координате сканирования,  $b$  – глубина определяется по расстоянию до базовой поверхности

Верхний ряд изображений рис. 5 демонстрирует сечение измеренной поверхности плоскостью, параллельной образующей цилиндра. Средний ряд – сечение плоскостью, перпендикулярной образующей. Нижний ряд отображает карты высот (цвет каждой точки определяется ее высотой/глубиной), полученные при автоматическом контроле оболочки с наколом глубиной 55 мкм.

### *Заключение*

Разработана и создана система автоматического контроля внешнего вида оболочек твэлов, обладающая следующими характеристиками:

- скорость контроля внешнего вида: до 166 мм/с;
- вероятность выявления недопустимых дефектов: не менее 0,95;
- скорость измерения глубины дефектов: не более 4 минут на оболочку;
- диапазон измерения глубины/высоты рельефа: 50 мкм;
- погрешность измерения глубины/высоты рельефа:  $\pm 5$  мкм.

В настоящий момент система находится в опытной эксплуатации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Карлов Ю. К., Кулешов В. К. Комплексный контроль дефектов внешнего вида твэлов ВВЭР-1000 // Приборы. – 2013. – № 10. – С. 21–25.
2. Семеренко А. В., Чащин С. Б., Норченко Ю. Г., Марченко В. Г. Автоматизированная вихретоковая система ELO 3T для контроля оболочек твэлов // Территория NDT. – 2016. – № 3. – С. 32–34.
3. Александров А. Б., Жуков Ю. А., Васюков В. Н., Грузман И. С., Карлов Ю. К., Спектор А. А. Автоматическое обнаружение непроваров и газовых пар при ультразвуковом контроле сварных швов циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов // Дефектоскопия. – 2004. – № 4. – С. 20–27.
4. Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В. Измерение поверхностных дефектов на основе низкокогерентной интерферометрии // Датчики и Системы. – 1999. – № 6. – С. 25.
5. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автотрия. – 2010. – Т. 46, № 2. – С. 119–128.
6. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К. Система контроля механических повреждений внешней поверхности оболочки ТВЭЛ реактора БН-800 // Датчики и Системы. – 2015. – № 9–10. – С. 58–61.
7. Выхристюк И. А. Использование нейросетевых технологий для автоматизации контроля внешнего вида твэлов реакторов БН-800 // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2020. XVI междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 18 июня – 8 июля. 2020 г.) : сб. матер. в 8 т. – Т. 8. №1: СибОптика-2020: нац. конф. с междунар. участ. Новосибирск. – 2020. – С. 88–96. DOI: 10.33764/2618-981X-2020-8-1-88-96.
8. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Степнов Л. М. Автоматизированная система контроля качества поверхности // Приборы. – 2014. – № 12. – С. 31–37.

© И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, 2021