

УДК 621.039.542 : 620.16

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК

А. В. Белобородов¹, Е. В. Власов^{1, 2}, П. С. Завьялов¹, Л. В. Финогенов¹

¹ Учреждение Российской академии наук
Конструкторско-технологический институт научного приборостроения
Сибирского отделения РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: finog@tdisie.nsc.ru

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный технический университет»,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

Рассматриваются оптико-электронные методы контроля внешнего вида топливных таблеток тепловыделяющих элементов атомных станций. В предложенных методах регистрация изображений поверхностей таблеток производится в отражённых лучах с помощью цифровых камер, что обеспечивает высокий контраст дефектных областей на фоне кадра. Приведены алгоритмы обработки изображений для выявления дефектных изделий. Создан экспериментальный образец системы производительностью до 10 табл./с. Для обучения системы разработана база данных, содержащая изображения поверхностей имитаторов и реальных таблеток. Результаты обработки в реальном времени полученных изображений показали вероятность обнаружения дефектных таблеток не менее 95 %.

Ключевые слова: система технического зрения, топливная таблетка, дефекты, обработка изображений.

Введение. Топливные таблетки из UO_2 являются одной из основных частей тепловыделяющих элементов атомных реакторов. В связи с этим к качеству таблеток предъявляются жёсткие требования, и прежде всего к их поверхности. В процессе изготовления на поверхности таблеток, имеющих цилиндрическую форму, могут возникать различные дефекты. Они обычно образуются в наиболее напряжённых частях таблеток, например сколы по торцам, трещины на боковой поверхности [1].

Наличие субъективного фактора при визуальном контроле таблеток является причиной пропуска дефектных изделий в класс годных. Кроме того, визуальный контроль характеризуется низкой производительностью. Отмеченные недостатки обуславливают актуальность задачи автоматизации операции обнаружения дефектных таблеток. Для её решения было предложено использовать оптико-электронные методы систем технического зрения и математический аппарат обработки изображений.

Цель предлагаемой работы — исследование методов получения изображений поверхностей таблеток, создание базы данных с изображениями годных и дефектных таблеток, алгоритмов обработки оптической информации, а также опытного и экспериментального образцов систем для осмотра поверхности (внешнего вида) таблеток производительностью 1 и 10 табл./с соответственно. Достигнутая вероятность обнаружения дефектных таблеток составляет 0,95.

Получение изображений поверхностей таблеток. Топливная таблетка представляет собой цилиндрическое изделие высотой 9–12 мм с центральным отверстием диаметром 1,4 мм и наружным диаметром примерно 7,6 мм. Так как при производстве таблетки перемещаются в непрерывном потоке, невозможно получить одновременный доступ к

осмотру всех поверхностей. Поэтому необходимо в системе контроля предусмотреть механизм, обеспечивающий последовательный осмотр поверхностей. Для автоматического осмотра торцевых поверхностей таблетку можно переориентировать в потоке, повернув её на 90° к направлению движения, затем зарегистрировать изображения с помощью цифровых камер. Изображение развёртки боковой поверхности получают либо путём вращения таблетки вокруг оси с одновременной регистрацией информации линейной камерой, либо путём одновременной регистрации изображений секторов поверхности с последующей сшивкой информации на цифровом уровне. При этом таблетка непрерывно движется в потоке в направлении своей оси. Успешная реализация любой системы технического зрения в определяющей степени зависит от качества изображения осматриваемого объекта. В процессе разработки системы контроля таблеток как на имитаторах, так и на реальных изделиях исследовались разные способы получения изображений поверхностей таблеток. Конечной целью исследований являлось формирование стабильных, с высокой степенью повторяемости и достаточным разрешением изображений, пригодных для последующей высокопроизводительной достоверной математической обработки, достижение максимальной степени независимости изображения и, следовательно, результатов обработки от индивидуальных особенностей отдельных изделий и их партий (изменения параметров исходных материалов, запыления, налётов, пятен побежалости и т. п.).

Известные технические решения [2, 3] с регистрацией рассеянного поверхностью таблетки излучения не давали высококонтрастных изображений. Положительные результаты достигнуты при использовании схем получения изображений, в которых освещение поверхностей и регистрация изображений производились под равными углами по отношению к нормали к контролируемой поверхности [4].

При формировании изображения торца (рис. 1) источник 1 освещает торцевую поверхность таблетки 2 под углом φ к нормали. Свет, отражённый от плоской части торца, воспринимается видеокамерой 3 также под углом φ . При этом плоская часть торца играет роль зеркала и выглядит на изображении как яркая область, оконтуренная более тёмной фаской, а любой дефект на плоскости — как контрастное тёмное пятно за счёт того, что свет рассеивается по сторонам (рис. 2). Внутренние неровности дефекта также могут отражать свет в направлении камеры, однако для поиска дефектов учитывается только тёмная кайма на границе дефекта.

Зеркальные свойства торцов таблеток обусловлены технологией производства (пресование мелкодисперсного порошка). Отражающие свойства, как показывают экспериментальные данные, слабо зависят от таких факторов, как запыление, побежалость и т. п. Представленный принцип получения изображения, основанный на базовом законе геомет-

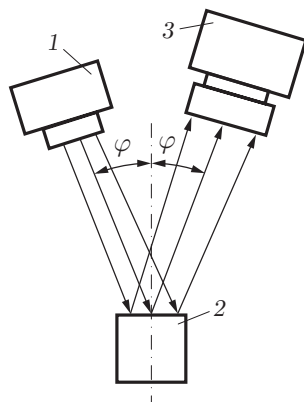


Рис. 1. Схема формирования изображения торца таблетки

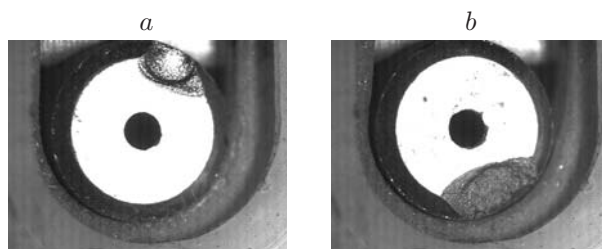


Рис. 2. Примеры изображений торцевых поверхностей таблеток с характерными дефектами: *a* — скол на торце с выходом на фаску; *b* — с выходом на фаску и боковую поверхность

рической оптики, даёт однозначно интерпретируемое изображение плоской части торца. На этих изображениях фаска оказывается неравномерно освещённой. Кроме того, невозможно категорично судить о наличии дефекта на ней. Как следствие, изображение фаски не обрабатывается. Однако любые дефекты, помещающиеся на фаске и не выходящие на плоскую часть торца, автоматически оказываются в допуске, так как их размеры не превышают размеров дефектов по условиям отбраковки. Площадь частей дефектов, которые выходят с плоской части торца на фаску, вычисляется косвенным путём с некоторым завышением, что может привести к небольшой перебраковке, но не к пропуску дефектного изделия в годные.

Для формирования изображения развёртки боковой поверхности (рис. 3) используется протяжённый вдоль образующей таблетки источник 1, освещающий через матовый рассеиватель 2 сегмент боковой поверхности 5 таблетки 4, вращаемой вокруг своей оси. Свет, отражённый от поверхности, регистрируется линейной ПЗС-камерой 3. Примеры изображений даны на рис. 4. Зеркальная составляющая является превалирующей, и, как в случае торца, на изображении большинство дефектов проявляется в виде тёмных пятен. Существенным отличием является очень малый телесный угол, в котором распространяется основная часть отражённого света. В связи с этим приходится разносить источник света по углу во всём сегменте (добавляется второй ряд источников света) и матировать его. Это позволяет создать зону освещения, в которой можно получить хорошее изображение боковой поверхности таблетки даже при существенных отклонениях её позиции, хотя это и приводит к некоторому снижению контраста.

Отметим также, что на боковой поверхности часть дефектов проявляется на изображениях в виде ярких, а не тёмных пятен (непрошлифовка) и их важно отличать от ярких отражений дна дефектов. Этот факт учитывается при обработке: ведётся независимый поиск тёмных и светлых фрагментов. Получаемое таким образом изображение даёт полную картину состояния боковой поверхности.

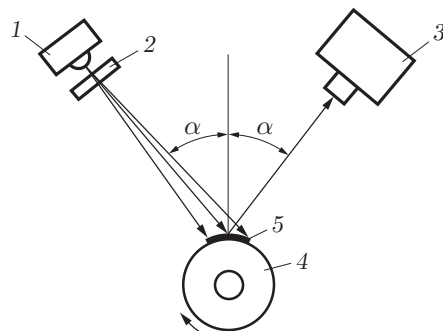


Рис. 3. Схема формирования изображения развёртки боковой поверхности

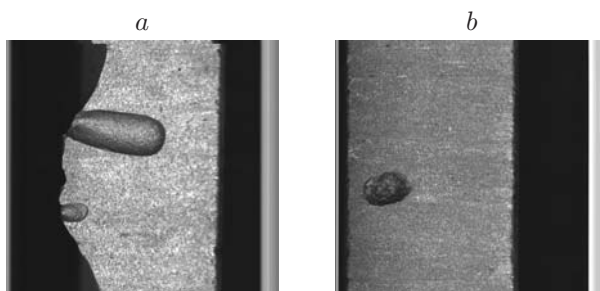


Рис. 4. Примеры изображений боковых поверхностей таблеток с характерными дефектами:
a — таблетка раскола, и видны сколы; *b* — выкрашивание

Формирование базы данных, алгоритм обработки изображений. С использованием приведённых методов получены изображения большого числа (более 1000) поверхностей реальных дефектных и бездефектных изделий. Массив изображений внесён в специально созданную базу данных, которая позволяет просматривать изображения, делать выборки по типу брака и применяется при разработке программ обнаружения дефектов. Дополнительно в базу данных внесены изображения имитаторов таблеток, изготовленных из различных материалов и предназначенных для использования в качестве образцов при настройке и проверке системы в лабораторных условиях. Классификация проводилась в следующих целях:

- выявление характерных типов отклонений внешнего вида как основных (специфицированных в техническом задании), так и дополнительных (найденных в процессе работы и не являющихся бракующими признаками, но влияющими на процесс и результаты обработки изображений);

- контроль алгоритмов обработки для различных типов дефектов и их комбинаций.

В процессе классификации выявлялись характерные особенности проявления дефектов на изображениях.

Алгоритм обработки изображения торца включает следующие этапы [5]: поиск внешних контуров белых участков, построение границы белого участка, коррекция границы плоской части торца, поиск границы отверстия, поиск дефектов, отбраковка. Решение об отбраковке изделия принимается с помощью методов распознавания образов по логическому решающему правилу

$$\text{If}(s_i > s_0), \vee(S > S_0), \text{ then("Брак")}, \quad (1)$$

где s_i — площадь очередного дефекта; s_0 — допустимая площадь отдельного дефекта; S — сумма площадей дефектов; S_0 — допустимая суммарная площадь дефектов.

Алгоритм обработки изображения боковой поверхности выполняет поиск границ боковой поверхности, отбраковку по ширине изображения, отбраковку по проскальзыванию, выделение тёмных дефектов, выделение светлых дефектов, определение размеров дефектов, исключение мелких и ложных дефектов, исключение вложенных дефектов. Решение об отбраковке изделия по трещинам и другим дефектам принимается в соответствии с логическим правилом

$$\text{If}(s_i > s_0), \vee(S > S_0), \vee(l_j > l_0), \vee(L > L_0), \text{ then("Брак")}, \quad (2)$$

где l_j — длина j -й трещины; l_0 — допустимая длина отдельной трещины; L — суммарная длина всех трещин; L_0 — допустимая суммарная длина всех трещин.

Приведённые методы регистрации изображений и алгоритм обработки были использованы в опытном образце системы контроля производительностью 1 табл./с. Испытания

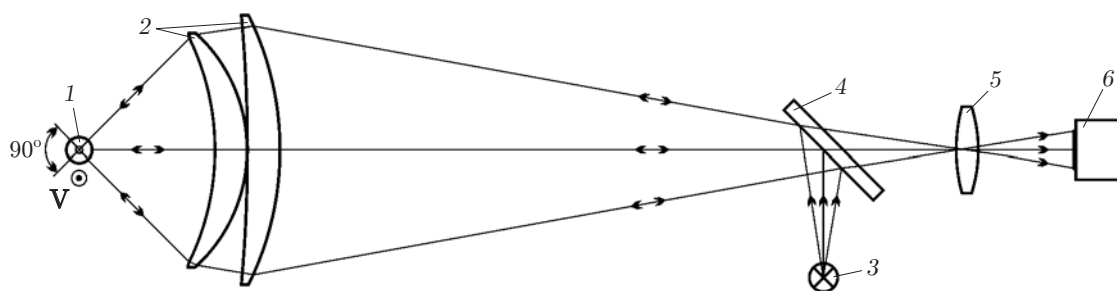


Рис. 5. Принцип получения изображения боковой поверхности таблетки

продемонстрировали уверенную работу системы с вероятностью обнаружения дефектных таблеток не менее 95 %. Однако необходимость вращения таблетки в такой системе для получения изображения боковой поверхности накладывает принципиальные ограничения на производительность системы.

Многоканальный высокопроизводительный метод контроля боковой поверхности таблеток. Для решения задачи быстрой регистрации цилиндрической поверхности таблеток разработан метод на основе специальных объективов [6]. Принцип контроля боковой поверхности поясняет рис. 5. Таблетка 1 движется по призме с прорезью (на рисунке не показана) вдоль своей оси. Фрагмент изображения боковой поверхности формируется с помощью объектива 2 со специально рассчитанной кривизной поля и стандартного фотообъектива 5. Регистрация изображения производится камерой 6. В качестве источника света используется лазерный светодиод 3, который через полупрозрачную пластину 4 освещает боковую поверхность таблетки. При этом наблюдение и освещение каждой точки изделия осуществляется по нормали к поверхности, что обеспечивает высокий контраст дефектов. Полное изображение боковой поверхности в процессе естественного движения таблетки в технологическом потоке можно получить, установив четыре таких оптических канала в одной плоскости. Для проверки метода был изготовлен двухканальный вариант экспериментальной установки (рис. 6). Пример фрагмента изображения поверхности имитатора приведён на рис. 7, а. Видно, что в изображении

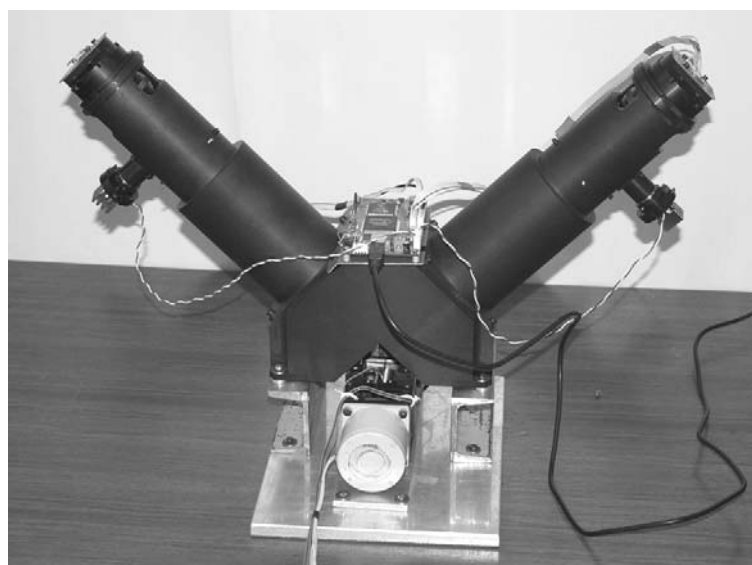


Рис. 6. Двухканальный экспериментальный образец системы контроля боковой поверхности топливных таблеток

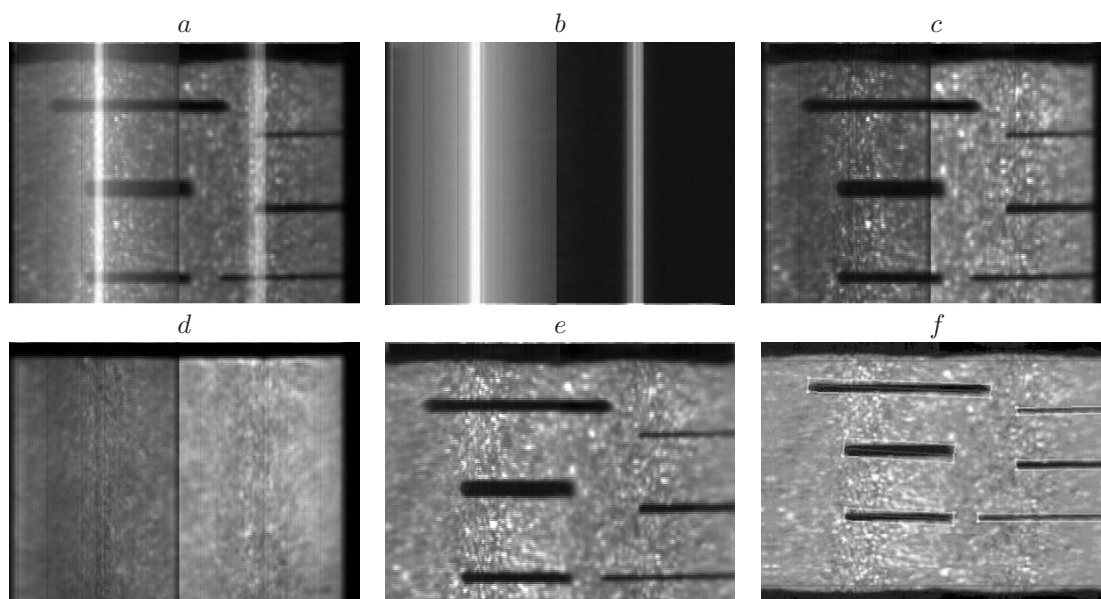


Рис. 7. Предобработка изображения: *a* — исходное изображение (контраст дефектов 0,36, разрешение 25 мкм/пиксел); *b* — фоновое изображение; *c* — изображение с вычтенным фоном; *d* — изображение образцовой таблетки с вычтенным фоном; *e* — предобработанное изображение (контраст дефектов 0,96, разрешение 25 мкм/пиксел); *f* — результат выделения дефектов

проявляется как неравномерность освещения, так и блик за счёт переотражений от оптических поверхностей, контраст дефектных областей не превышает 0,47. В связи с этим перед использованием алгоритма обнаружения дефектов необходимо выполнить предобработку полученных изображений. Первый этап предобработки заключается в операции вычитания из исходного изображения $F(x, y)$ (см. рис. 7, *a*) фонового изображения $F_{\Phi}(x, y)$ (рис. 7, *b*) в отсутствие таблетки (изображение блика):

$$F_1(x, y) = F(x, y) - F_{\Phi}(x, y). \quad (3)$$

Изображение с вычтенным фоном приведено на рис. 7, *c*. Для коррекции неравномерности освещения используется изображение $F_{1обр}(x, y)$ поверхности таблетки без дефектов с вычтенным фоном (рис. 7, *d*), на которое нормируется изображение $F_1(x, y)$:

$$F_{пр}(x, y) = k[F_1(x, y)/F_{1обр}(x, y)], \quad (4)$$

где $k = 128$ (половинный уровень используемого числа градаций яркости).

Предобработанное изображение показано на рис. 7, *e*. В результате предобработки контраст дефектных областей на изображении достигает 0,96 и качество полученного изображения гарантирует уверенное обнаружение дефектов с помощью описанных ранее алгоритмов (рис. 7, *f*).

Обработанные изображения боковой поверхности реальных таблеток приведены на рис. 8. Скорость контроля составляет 100 мм/с (10 изд./с).

В целом качество изображения боковой поверхности реальных таблеток удовлетворительное, однако в дальнейшем целесообразно использовать более интенсивное освещение (лазерный модуль с более высокой мощностью) и/или специальный режим видеоматрицы (суммирование зарядов смежных ячеек в один пиксел при считывании информации).

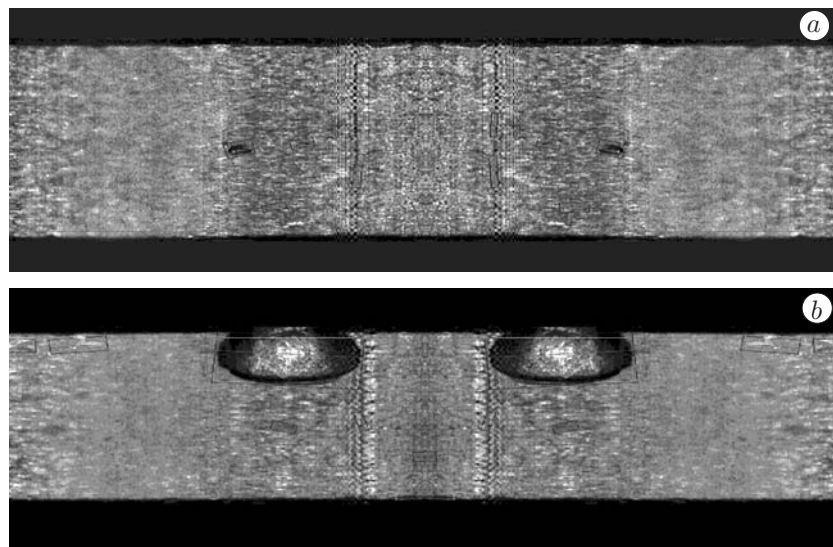


Рис. 8. Примеры обработанных изображений реальных таблеток с характерными дефектами (для получения полноформатного кадра изображение размножено путём зеркального отражения): *a* — пора, *b* — раковина; разрешение 25 мкм/пиксел в обоих направлениях

Высокопроизводительный контроль торцевых поверхностей таблеток. Высокая производительность контроля торцевых поверхностей таблеток при их движении была достигнута за счёт новой технической реализации ранее описанного метода, а именно при использовании КМОП-камер с короткой выдержкой и современных компьютерных технологий, основанных на многоядерных процессорах.

Полученные с помощью новой системы контроля изображения имитаторов показаны на рис. 9.

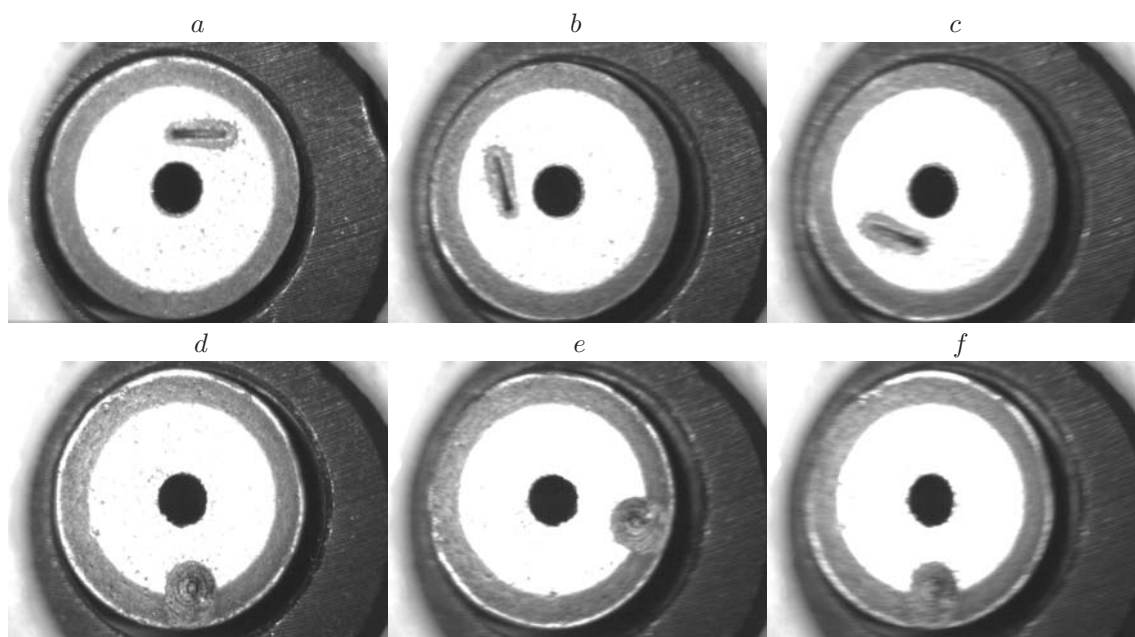


Рис. 9. Изображения торцевых поверхностей имитаторов зарегистрированы: *a, b* — в статике; *c, d* — в динамике на скорости 50 мм/с (5 шт/с); *e, f* — в динамике на скорости 100 мм/с (10 шт/с)

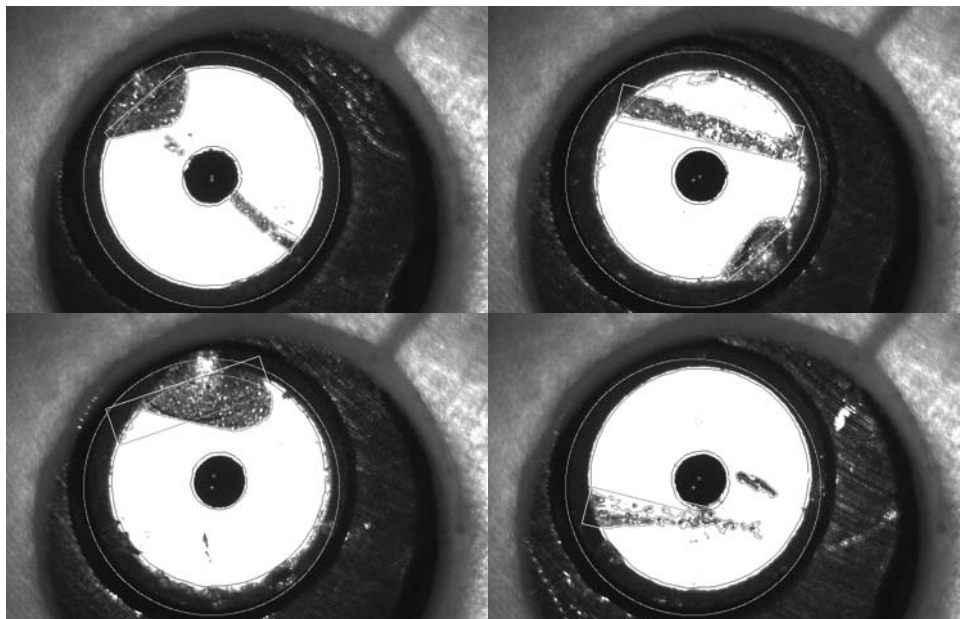


Рис. 10. Обработанные изображения торцевых поверхностей реальных таблеток с характерными дефектами (производительность 10 изд./с, разрешение 18 мкм/пиксел)

Для объективной характеристики зарегистрированных изображений определена контрастность дефектов на фоне бездефектной поверхности. Изображения торцевой поверхности таблеток обладают контрастностью в среднем 0,62. Такой контраст позволяет уверенно обнаруживать дефекты на торцевой поверхности с помощью ранее описанных алгоритмов. На рис. 10 приведены изображения торцов таблеток с автоматически обнаруженными дефектами в реальном времени. Более четкое изображение по сравнению с имитаторами (см. рис. 9) обусловлено существенным снижением времени экспозиции за счёт более высокой отражающей способности торцов реальных таблеток.

Заключение. В данной работе рассмотрены оптико-электронные методы и экспериментальные установки для многоканального высокопроизводительного контроля качества поверхности (внешнего вида) топливных таблеток тепловыделяющих элементов атомных станций. Создана база данных изображений реальных таблеток и имитаторов. Описаны алгоритмы обработки изображений для выявления дефектных изделий. Разработан экспериментальный образец системы с производительностью 10 табл./с. На имитаторах и реальных изделиях проведена проверка технических решений по реализации методов быстрой регистрации изображений поверхностей таблеток с производительностью до 10 изд./с. Результаты обработки полученных изображений в реальном времени показали вероятность обнаружения дефектных таблеток не менее 95 %.

Представленные в работе материалы используются при создании промышленных систем контроля качества поверхности топливных таблеток.

Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук Ю. В. Чугую и д-ру техн. наук Н. Г. Загоруйко за полезные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Решетников Ф. Г., Бибилашвили Ю. К., Головин И. С. и др. Разработка, производство и эксплуатация тепловыделяющих элементов энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1995. Кн. 1. 320 с.

2. **Pat. 4226539 US.** Cylindrical body appearance inspection apparatus /Y. Nakagawa, H. Makihira, T. Hamada. Publ. 7.10.1980.
3. **Pat. WO 2000/028549 BE.** Method and device for integral visual inspection and remote screening of nuclear fuel pellets /A. Vandergheyns, S. Shihab. Publ. 18.05.2000.
4. **Пат. 2323492 РФ.** Способ обнаружения поверхностных дефектов цилиндрических объектов /А. В. Белобородов, С. Е. Гуляевский, Н. Г. Загоруйко и др. Оpubл. 27.04.2008, Бюл. № 12.
5. **Finogenov L. V., Beloborodov A. V., Ladygin V. I. et al.** An optoelectronic system for automatic inspection of the external view of fuel pellets // Russian Journ. Nondestruct. Test. 2007. **43**, N 10. P. 692–699.
6. **Beloborodov A. V., Lavrenyuk P. I., Pimenov Y. V. et al.** Application of technical vision for external view inspection of fuel pellets // Proc. of the Intern. Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments. Saint-Petersburg, 2009. Vol. 2. P. 2-143–2-147.
URL: http://ets.ifmo.ru:8101/tomasov/konferenc/AutoPlay/Docs/Volume 2/4_29.pdf (дата обращения: 17.06.2010).

Поступила в редакцию 18 февраля 2010 г.
