

## СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В РАДИАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ (ОБЗОР)

В. А. ТРОИЦКИЙ<sup>1</sup>, С. Р. МИХАЙЛОВ<sup>2</sup>, Р. О. ПАСТОВЕНСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев-56, просп. Победы, 37. E-mail: fel@kpi.ua

Рассмотрен перспективный метод получения цифрового изображения результатов радиационного контроля без промежуточных носителей данных. Проанализированы преимущества флэш-радиографии: высокая производительность; низкая стоимость; возможность многокурсного наблюдения в реальном времени внутренних дефектов сварных соединений; отсутствие промежуточных носителей информации. Выполнено сравнение основных методов получения цифрового изображения. Предложена новая технология радиационного контроля на основе малогабаритных полупроводниковых детекторов, которая получила название X-ray mini технология. Библиогр. 24, рис. 4.

*Ключевые слова:* неразрушающий контроль, флэш-радиография, цифровое изображение, рентгенотелевизионная система, сцинтиллятор, твердотельный детектор, внутренние дефекты сварных соединений, X-ray mini технология

Наиболее распространенным видом неразрушающего контроля (НК) качества сварных соединений, материалов и изделий является радиационный контроль. Радиационные методы НК применимы к изделиям из любых материалов и превосходят полнотой информации о дефектах (тип, форма, размеры, место расположения) другие виды НК (акустический, магнитный, вихретоковый и др.) [1].

В последние годы произошли существенные качественные изменения в возможностях радиационного НК, прежде всего благодаря появлению новых многоэлементных полупроводниковых детекторов радиационных изображений, а также интенсивному внедрению цифровых технологий получения, обработки и анализа изображений. При использовании таких детекторов и цифровых технологий ионизирующее излучение, прошедшее через контролируемый объект и несущее информацию о внутренних его дефектах, с помощью электронных средств преобразуется в массив электрических сигналов, которые оцифровываются, обрабатываются и используются для формирования цифрового изображения (ЦИ) контролируемого объекта. ЦИ содержит информацию о внутренней структуре объекта и может наблюдаться непосредственно во время просвечивания, т. е. в реальном времени. Такой метод радиационного контроля, без расходных материалов и без промежуточных носителей информации, с получением ЦИ в реальном времени называется флэш-радиографией [2]. К важным достоинствам флэш-радиографии следует отнести возможность компьютерной обработки и анализа ЦИ, создания электронных архивов ЦИ, их документирования и последующей передачи с использованием компьютерных сетей.

Отличительной особенностью флэш-радиографии является отсутствие промежуточных носителей информации — радиографических пленок, запоминаящих пластин с фотостимулируемой памятью. Распространенные сейчас технологии с промежуточными носителями информации требуют для подбора режима неоднократных операций экспонирования, обработки и дорогих технических устройств для считывания и оцифровки информации. Соответственно отсутствие промежуточных носителей информации (пленок, запоминаящих пластин) позволяет на порядок повысить производительность и значительно снизить стоимость контроля качества изделий.

**Методы получения ЦИ.** Изучение внутренних дефектов объекта с помощью портативной рентгенотелевизионной техники с цифровой обработкой изображений в ближайшие годы должно принципиально изменить технологию радиационного НК. В последнее время понятие «цифровое изображение» (оптическое и радиационное) находит все более широкое распространение в дефектоскопии. Аппаратно-программные комплексы обработки, оцифровки рентгеновских пленок, формирующие ЦИ, находят все большее распространение [3]. ЦИ получают и с помощью запоминаящих пластин, применяемых вместо рентгеновских пленок [4–7]. Приемы и алгоритмы обработки ЦИ для трех вариантов радиационного контроля являются общими (рис. 1–3). Это важное направление в современной радиационной дефектоскопии. Сейчас чаще всего ЦИ получают оцифровкой рентгенограмм. Реже оно получается при обработке скрытого изображения, считываемого



Рис. 1. Традиционная схема радиографического контроля с использованием пленки и оцифровки рентгенограмм: зарядка кассет (1); просвечивание на рентгеновскую пленку (2); процедура обработки пленки (3); сканирование пленки (4); ЦИ (5)

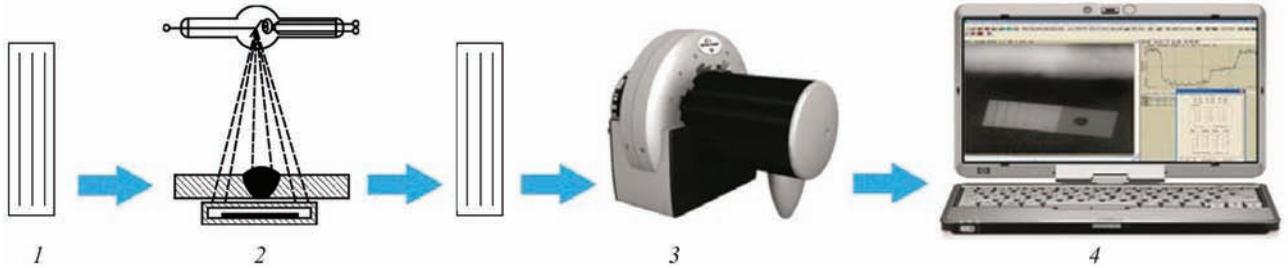


Рис. 2. Схема технологии просвечивания с использованием запоминающей пластины: подготовка кассеты с запоминающей пластиной (1); просвечивание на запоминающую пластину (2); считывание пластин (3); ЦИ (4)

с запоминающих пластин многократного использования. Точно такой результат может быть получен с помощью цифровых детекторов флэш-радиографии без дополнительных расходов, связанных с промежуточными носителями информации [2, 8, 9].

На рис. 1 приведена классическая технологическая схема получения ЦИ за счет оцифровки пленочных рентгенограмм. Эта традиционная технология распространена во всем мире, во всех отраслях промышленности. Она требует подготовки кассеты с пленкой и экранами. После просвечивания следуют процедуры химической обработки, сушки пленки, считывание информации на негатоскопе и оцифровывание результатов с помощью соответствующего компьютерного комплекса. Этой технологией пользуются в основном для компактного архивирования результатов НК в электронном виде и для получения дополнительной информации, которую нельзя получить без оцифровки.

На рис. 2 приведена схема более совершенной технологии получения ЦИ на основе запоминающих пластин (компьютерная радиография). По сравнению с предыдущей схемой получения ЦИ данная технология обеспечивает возможность

многократного использования промежуточного носителя информации (запоминающей пластины). Здесь отсутствует мокрый процесс проявки и прочие обязательные процедуры.

На рис. 3 приведена схема технологии мгновенной (флэш) цифровой радиографии на основе флюороскопических и твердотельных детекторов [10, 11]. Это самый быстрый и самый дешевый способ получения ЦИ в электронном виде, не требующий обрабатывающего и считывающего оборудования и соответствующего вспомогательного времени.

Сравнение качества изображений, получаемых с помощью различных детекторных систем, выполнено в работе [12]. Для технологий без промежуточных носителей информации разработаны методики калибровки и вычитания собственных шумов преобразователей. Таким образом улучшают контрастную чувствительность настолько, что удастся отмечать изменения 1/1000 радиационной толщины, тогда как для лучших пленок класса C1 по европейскому EN 584-1 и американскому ASTM E 1815 стандартам может быть достигнут лучший контраст 1/100.

Качество рентгеновского изображения определяется по эталонам чувствительности (ГОСТ 7512–82). Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля осуществляется по ГОСТ 23055–78. Известно, что чем больше плотность почернения, тем больше информации содержит экспонированная пленка. Поэтому для оцифровки плотных пленок, получения более информативных их ЦИ нужен хороший сканер. Распространенные считывающие устройства, недорогие сканеры, не могут обеспечить высокого качества оцифровки рентгеновских снимков, если их относи-

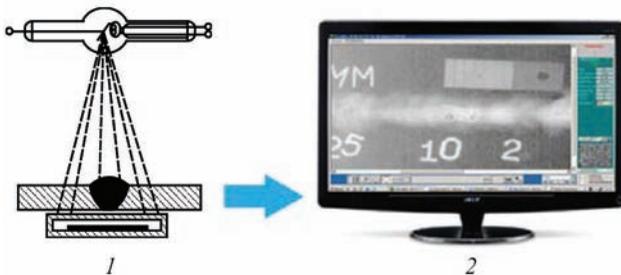


Рис. 3. Схема просвечивания без промежуточных носителей информации: просвечивание на твердотельный детектор (1); ЦИ (2)

тельная плотность почернения выше, чем 3 ед. Все попытки получения удовлетворительных ЦИ от более плотных пленок не увенчались успехом. Поэтому, в пленочном варианте (рис. 1), удовлетворительное ЦИ возможно, если оптическая плотность пленок находится только в диапазоне 1,5...2,5 ед. При таких значениях шумы оцифровщика не вносят непоправимых искажений в ЦИ. Опыт оцифровки пленочных снимков с плотностью порядка 3...3,2 ед. уже показывает неудовлетворительные результаты, трудно воспроизводится тонкая информация. Например, теряются изображения мелких пор диаметром менее 0,2 мм, трещины с малым раскрытием. Таким образом, оцифровка пленок имеет существенные ограничения. Часть дефектов, обнаруживаемых с помощью негатоскопа, не обнаруживается на ЦИ. Это существенный недостаток традиционной пленочной радиографии, практически непреодолимый в реальном производстве.

Беспленочные технологии по схемам рис. 2, 3 не имеют этого недостатка, они отличаются большим динамическим диапазоном, что расширяет возможности НК.

Особый интерес представляют технологии на основе небольших, в несколько квадратных сантиметров, твердотельных цифровых электронных преобразователей. Они не имеют ограничений, связанных с размерами кассет, экранов, запоминающих пластин. Мобильные преобразователи могут свободно перемещаться по поверхности объекта. Такие возможности заложены в диагностику широко применяемых на практике больших таможенных объектов, которые могут быть значительных размеров [13]. Контролировать подобные объекты с помощью промежуточных носителей информации (пленок, запоминающих пластин) практически невозможно. Миниатюрные твердотельные преобразователи могут обогатить конструкции различной формы. Изображения от отдельных небольших преобразователей сшиваются в общее изображение объекта сложной формы.

В США, Японии и других странах ведутся интенсивные работы по совершенствованию твердотельных электронных преобразователей, мобильных рентгентелевизионных дефектоскопов, которые вытесняют ультразвуковую технику благодаря лучшим дефектоскопическим возможностям [14]. Эта тенденция со временем получит распространение и в других странах.

В США, Японии и Европе уже десятки фирм производят твердотельные цифровые преобразователи практически для любых задач радиационного контроля [15–17].

При сравнении возможностей отдельных методов радиационного контроля надо учитывать ди-

намический диапазон. Это толщины объекта, доступные удовлетворительному анализу на одном изображении. Большой динамический диапазон дает существенные преимущества технологиям по схеме рис. 2, 3 в сравнении с пленочной радиографией. Обычно большой динамический диапазон достигается за счет экспозиционной дозы, что в пленочных системах ограничено относительной плотностью почернения 3...4 ед. Далее при больших плотностях пленки делаются нечитаемыми. В случае цифровых детекторных систем (без промежуточных носителей) за счет компьютерных технологий «экспозиция», т. е. накопление информации, не имеет ограничений. При этом отношение сигнал/шум (SNR) растет пропорционально квадрату корню дозы. Это эквивалентно времени экспозиции или количеству усредненных изображений. Так достигается отношение SNR, равное нескольким тысячам, и высокое качество ЦИ. На практике этот процесс ограничивается контрастной чувствительностью 0,1 %, что соответствует SNR порядка 1000.

Цифровая обработка изображений сопровождается протокольными процедурами. Они включают операции оценки пригодности ЦИ, измерения интенсивности серого, оптической плотности и определения чувствительности. Цифровая шкала серого, обычно 16-битная [4], имеет тысячи оттенков, а гистограмма ЦИ должна лежать примерно по центру этой шкалы, чтобы избежать недоэкспонирования или переэкспонирования. Центральное расположение гистограммы дает возможность более качественной цифровой обработки, т. е. позволяет проводить масштабирование градаций серого. Применяется операция калибровки по размеру, которая позволяет измерять дефекты, выполнять другие процедуры, несвойственные традиционной пленочной радиографии и ультразвуковому контролю.

Следует отметить и большие успехи радиационных преобразователей на основе подвижных сканирующих линеек с детекторами, которые находят применение в таможенном контроле [18]. Все попытки применить такие преобразователи для контроля сварных соединений пока не увенчались успехом. Эти системы непрерывно совершенствуются.

В последние годы значительных успехов достигли разработчики флюороскопических преобразователей по системе «сцинтилляционный экран–объектив–ПЗС-матрица» [1, 19, 20]. Успех этих преобразователей лежит в качестве монокристаллических CsI (Tl) и порошковых  $Gd_2O_2S(Tb)$ ,  $Gd_2O_3(Eu)$  экранов и в совершенстве видеокамер. Важно уметь подобрать оптимальный экран. Для этого сравнивается их квантовая эффективность детектирования ( $K_{ЭД}$ )  $\eta_{кв.эф}$ .  $K_{ЭД}$  является одним

из наиболее важных комплексных параметров, определяющих эффективность преобразования энергии в цифровом детекторе. КЭД определяется по формуле [20]:

$$\eta_{\text{кв.эф}} = \frac{\Psi_{\text{ВЫХ}}^2}{\Psi_{\text{ВХ}}^2}, \quad (1)$$

где  $\Psi_{\text{ВХ}}$  и  $\Psi_{\text{ВЫХ}}$  — отношение SNR на входе и выходе системы соответственно.

КЭД даст возможность сделать выводы о целесообразности применения того или иного экрана для конкретной задачи, решаемой рентгенотелевизионной системой (РТВС) типа «сцинтилляционный экран—объектив—ПЗС-матрица». Такие системы имеют ряд преимуществ перед другими: возможность смены сцинтилляционного экрана, что позволяет изменять размер рабочего поля и другие параметры системы; малое время получения изображения; простота конструкции; малые габариты и масса; низкая стоимость.

Проведенные исследования показали, что с ростом значения экспозиционной дозы  $P_D$  от нуля вначале происходит постепенное увеличение  $\Psi_{\text{ВХ}}$  и  $\Psi_{\text{ВЫХ}}$ . Зависимость отношения SNR на входе постепенно увеличивается и при определенном значении мощности экспозиционной дозы достигает максимума, а затем начинает падать.

Максимум соответствует сигналу полного заполнения зарядового пикселя ПЗС-матрицы, далее сигнал ограничивается. Итак, падение значения квантовой эффективности преобразователя определяется, в основном, диапазоном энергий рентгеновского излучения, которое может поглотить экран, и зарядом в пикселе, который может накопиться за один цикл. За счет накопления простыми техническими средствами на таких преобразователях можно достичь чувствительности промышленных рентгеновских пленок.

Рассчитанные зависимости отношения SNR на выходе РТВС от входной мощности экспозиционной дозы рентгеновского излучения позволяют для заданных длительностей накопления изображения в ПЗС-матрице определить оптимальные значения мощности экспозиционной дозы, которые обеспечивают наибольшее отношение SNR и наилучшую выявляемость дефектов. Исследования [20] показали, что квантовая эффективность рентгено-телевизионной системы с экраном  $\text{Gd}_2\text{O}_3(\text{Eu})$  выше, чем у системы с экранами  $\text{CsI}(\text{Tl})$  и  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}(\text{Tb})$ .

Преобразователи с экраном  $\text{CsI}(\text{Tl})$  при мощности экспозиционной дозы более 0,2 мР/с значение квантовой эффективности при увеличении  $P_D$  изменяется значительно меньше, чем в РТВС с экранами  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}(\text{Tb})$  и  $\text{Gd}_2\text{O}_3(\text{Eu})$ . В преобразователе с экраном  $\text{CsI}(\text{Tl})$  диапазон изменения  $P_D$ , в

котором наблюдается сравнительное постоянство квантовой эффективности, зависит от длительности накопления. Увеличение длительности накопления в ПЗС-матрице повышает значение квантовой эффективности со всеми экранами. Время накопления несоизмеримо меньше вспомогательного времени, которое необходимо для радиационного контроля с промежуточными носителями информации. Поэтому, флэш-радиография на основе флюороскопических преобразователей не менее перспективна, чем преобразователи на основе дорогих твердотельных детекторов прямого преобразования.

**X-ray mini технология радиационного контроля.** В современных рентгенотелевизионных системах возможно применение недорогих малогабаритных твердотельных детекторов. Новая технология на основе таких малогабаритных детекторов получила название X-ray mini [21, 22]. В отличие от традиционной пленочной радиографии или компьютерной радиографии, где в качестве детекторов применяют дорогие пленки или запоминающие пластины, X-ray mini технология позволяет значительно снизить стоимость и повысить оперативность контроля, а также обеспечивает практически мгновенный его результат. Важной особенностью X-ray mini технологии является миниатюрность рентгеновского детектора, что позволяет проводить оперативный рентгеновский контроль труднодоступных узлов эксплуатируемых самолетов, турбин, реакторов и т. п.

Например, детектор типа S10811-11 фирмы Hamamatsu Photonics (Япония) с размером рабочего поля 34×24 мм, толщиной 6 мм, размером пикселя 20 мкм и количеством пикселей 1700×1200 обеспечивает чувствительность контроля и разрешающую способность до 20 пар лин./мм. В ИЭС им. Е. О. Патона такая X-ray mini технология используется для контроля сварных соединений различных изделий, состояния сотовых панелей летательных аппаратов, структуры композитов, исследования замкнутых пространств, где невозможно разместить традиционные пленки или запоминающие пластины.

При реализации технологии X-ray mini используется детектор рентгеновского изображения, площадь которого более чем на два порядка меньше, чем площадь традиционных кассет с пленкой, запоминающих пластин или твердотельных детекторов стандартных размеров. Благодаря небольшим размерам такой миниатюрный твердотельный детектор может быть размещен в любом труднодоступном или стесненном пространстве, а также перемещаться по криволинейной поверхности контролируемого объекта. Такое сканирование позволяет исследовать обнаруженные дефекты и

неоднородности контролируемого объекта в разных ракурсах. В реальном времени информация о внутренней структуре исследуемого участка контролируемого объекта поступает на экран монитора. Основное отличие данной технологии X-ray mini от известной цифровой радиографии на основе твердотельных детекторов состоит в том, что стоимость такого миниатюрного детектора в десятки раз меньше, чем стоимость детектора стандартных размеров [23, 24].

Интересные решения на основе X-ray mini технологии получены в строительстве, при контроле качества сварки или механических соединений отдельных частей несущей арматуры (рис. 4).

Строительство высотных зданий и других ответственных сооружений связано со стыковой сваркой большого количества арматуры. Наиболее нагруженные стыковые соединения должны контролироваться физическими методами. Чаще всего, до последнего времени, это выполнялось с помощью средств ультразвукового контроля (УЗК). Метод УЗК эффективен только в тех случаях, когда стыковое соединение зачищено, хорошо обработано. Для этих целей применяют соответствующие клещи, контактный гель, прижимающие ультразвуковые преобразователи к соединяемым арматурным частям. Однако в последнее время, с распространением механических соединений арматуры с помощью обжимных трубок, применение УЗК прекратилось из-за его неэффективности. Ультразвуковое излучение не может исследовать зазоры, которые естественны для механических соединений обжатием (рис. 4). Поэтому в настоящее время такие контактные соединения несущих арматурных стержней контролируют с помощью X-ray mini технологии.

Применение пленочной рентгенографии в условиях строительной площадки нецелесообразно, поскольку требует специальных помещений для химической и прочих видов обработки пленки, негатоскопов для анализа результатов контроля. Портативные рентгенотелевизионные детекторы, которые перед контролем крепятся на контролируемом соединении, существенно ускоряют процесс оценки качества соединений арматуры. При этом обнаруживаются неплотности прилегания из-за некачественного обжатия, плохая стыковка стержней.

Рентгенотелевизионный контроль, в отличие от радиографического, обеспечивает мгновенный результат, не требует расходных материалов и специальных процедур обработки радиографической пленки.

На рис. 4 показана схема рентгенотелевизионного контроля с помощью твердотельного детектора. Здесь, как и в радиографическом исследова-

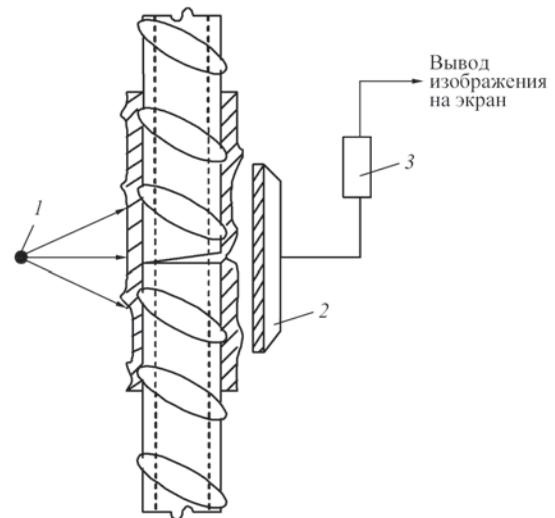


Рис. 4. Схема рентгенотелевизионного контроля: 1 — излучатель; 2 — твердотельный детектор; 3 — электронный преобразователь (описание 1–3 см. в тексте)

нии, излучатель 1 (радиоизотопный источник или рентгеновский аппарат) располагается напротив контролируемого соединения, с противоположной стороны которого находится твердотельный детектор 2. Изображение с твердотельного детектора через электронный преобразователь 3 выводится на экран монитора. В качестве монитора может быть использован смартфон или планшет, имеющий USB интерфейс. Таким образом, оперативно контролируется качество обжатия соединительной трубки (наличие стыкового зазора, уменьшения сечения арматуры и т. п.).

### Выводы

1. Серьезными недостатками традиционной пленочной радиографии являются низкая производительность и высокая стоимость контроля, а также необходимость в негатоскопах с мощными источниками света. При относительной плотности почернения более 4 единиц экспонированные снимки не поддаются расшифровке, а их оцифровка становится невозможной. Этому недостатка лишены современные технологии на основе миниатюрных твердотельных детекторов.

2. Электронная цифровая информация о результатах контроля содержит наглядные изображения внутренней структуры объектов, расширяет возможности дефектоскопии, повышает производительность и снижает стоимость радиационного контроля качества сварных соединений.

3. При X-ray mini технологии появилась возможность исследования внутренних дефектов объектов в разных ракурсах, что практически недоступно другим методам контроля. Твердотельные преобразователи могут располагаться и перемещаться в зонах, где размещение кассет с пленками или запоминающими пластинами прак-

тически невозможно. Такая технология реализуется на серийном оборудовании и позволяет более чем на порядок снизить стоимость контроля по сравнению с радиографией на основе плоскопанельных детекторов стандартных размеров.

4. Сканирование сложной поверхности миниатюрными детекторами и сшивание изображений отдельных экспозиций с помощью компьютерных программ позволяет контролировать протяженные объекты в разных ракурсах. Для выполнения сканирования конкретных объектов миниатюрными детекторами разрабатывается соответствующее вспомогательное оборудование.

### Список литературы

- Троицкий В. А., Михайлов С. Р., Пастовенский Р. А., Шило Д. С. (2015) Современные системы радиационного неразрушающего контроля. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 23–35.
- Троицкий В. А. (2013) Флэш-радиография. *Территория NDT*, 4, 44–49.
- Грудский А. Я., Величко В. Я. (2011) Оцифровка радиографических снимков – это не очень просто. *В мире неразрушающего контроля*, 4, 74–76.
- Цветкова Н. К., Новицкая К. А., Кологов А. В., Смирнов В. Г. (2014) Особенности применения комплексов цифровой радиографии при неразрушающем контроле корпусного производства. *Технология машиностроения*, 7, 47–50.
- Степанов А. В., Ложкова Д. С., Косарина Е. С. (2010) *Компьютерная радиография: результаты практических исследований возможности замены пленочных технологий*. Москва, ВИАМ.
- Соснин В. В. (2008) Книга 1: Визуальный и измерительный контроль. Книга 2: Радиационный контроль. Клюев Ф. П. (ред.) *Неразрушающий контроль*. Справочник в 8 т., т. 1, изд. 2-е. Москва, Машиностроение.
- Варламов А. Н. (2014) Опыт эксплуатации комплекса цифровой радиографии в полевых условиях. *В мире неразрушающего контроля*, 3, 25–28.
- Troitskiy V. (2016) Quick Industrial X-ray Testing without Intermediate Data Carriers of Information. *The NDT Technician*, 4, 15.
- Zscherpel U., Ewert U., Bavendiek K. (2007) Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: The new high contrast sensitivity technique – Examples and system theoretical analysis. *DIR 2007 – International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography, June 25–27, Lyon, France*.
- Ferreira de Olivera D. (2016) Relationship between Image Plates Physical Structure and Quality of Digital Radiographic Images in Weld Inspections. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 13–17 June, Munich, Germany.
- Iovea M. Fast X-ray Digital Radiography Equipment for In-line Production Control. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 13–17 June, 2016, Munich, Germany.
- Майоров А. А. (2009) Цифровые технологии в радиационном контроле. *В мире неразрушающего контроля*, 3, 5–12.
- Kokkooi S., Wrobel N., Hohendorf S. et al. (2015) Mobile High-energy X-ray Radiography for NDT of Cargo Containers. *Materials Evaluation*, 73, 2, 175–185.
- Троицкий В. А. (2015) Новые возможности радиационного контроля качества сварных соединений. *Автоматическая сварка*, 7, 56–60.
- Liang L. (2016) The Relationship Study between Penetration Thickness Ratio and the an Imaging Length in Digital Radiography. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 13–17 June, Munich, Germany.
- Vieyra M. (2016) Development of a Tangential Neutron Radiography System for Monitoring the Fatigue Cracks in Hydrogen Fuel Tanks. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 13–17 June, Munich, Germany.
- Duerr NDT GmbH and Co. KG, <http://duerr-ndt.de/ru/product>.
- Яценко С. Я., Кокоровец Ю. Я., Лозенко А. П. и др. (2015) Рентгентелевизионные системы «Полискан». *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 60–62.
- Майоров А. А. (2007) Рентгеновское телевидение в промышленном НК. *В мире неразрушающего контроля*, 1(35), 4–9.
- Шило Д. С., Михайлов С. Р., Писаренко Л. Д. (2016) Квантовая эффективность детектирования цифровых рентгентелевизионных систем на основе скитилляционных экранов и ПЗС-матриц. *Неразрушающий контроль и диагностика*, 4, 25–37.
- Троицкий В. А., Михайлов С. Р., Пастовенский Р. О. (2017) X-ray mini технология на основе твердотельных детекторов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 1, 25–29.
- Троицкий В. А., Михайлов С. Р., Бухенский В. Н. и др. (2014) Флэш-радиография объектов АЭС на основе плоскопанельных детекторов. *НК-информ*, 3(63), 6–14.
- Троїцький В. О., Карманов М. М., Михайлов С. Р., Пастовенський Р. О. (2016) *Пристрій для рентгенотелевізійного контролю*, Україна. Пат. на корисну модель 111974.
- Троїцький В. О. (2017) *Спосіб рентгенотелевізійного контролю зварних з'єднань*, Україна. Пат. на корисну модель 113257.

### Reference

- Troitsky, V.A., Mikhailov, S.R., Pastovensky, R.A. et al. (2015) Modern systems of radiation nondestructive testing. *Tekhn. Diagnostika i Nerazrush. Kontrol*, 1, 23-35.
- Troitsky, V.A. (2013) Flash-radiography. *Territoriya NDT*, 4, 44-49.
- Grudsky, A.Ya., Velichko, V.Ya. (2011) Digitizing of radiographs it is not so simple. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 4, 74-76.
- Tsvetkova, N.K., Novitskaya, K.A., Kologov, A.V. et al. (2014) Peculiarities of application of digital radiography complexes in nondestructive testing of bodies production. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, 7, 47-50.
- Stepanov, A.V., Lozhkova, D.S., Kosarina, E.S. (2010) *Computer radiography: Results of practical examinations for potential replacement of film technologies*. Moscow, VIAM.
- Sosnin, V.V. (2008) Book 1: Visual and measuring control. Book 2: Radiation control. Klyuev F.R. (ed.). In: *Nondestructive testing: Refer. book, Vol. 1*. Moscow, Mashinostroenie.
- Varlamov, A.N. (2014) Experience of operation of digital radiography complex in field conditions. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 3, 25-28.
- Troitskiy, V. (2016) Quick industrial X-ray testing without intermediate data carriers of information. *The NDT Technician*, 4, 15.
- Zscherpel, U., Ewert, U., Bavendiek, K. (2007) Possibilities and limits of digital industrial radiology: The new high contrast sensitivity technique – Examples and system theoretical analysis. In: *Proc. of Int. Symp. on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography – DIR 2007, June 25-27, Lyon, France*.
- Ferreira de Olivera, D. (2016) Relationship between image plates physical structure and quality of digital radiographic images in weld inspections. In: *Proc. of 19th World Conf. on Non-Destructive Testing*, 13-17 June, Munich, Germany.
- Iovea, M. (2016) Fast X-ray digital radiography equipment for in-line production control. In: *Proc. of 19th World Conf. on Non-Destructive Testing*, 13-17 June, Munich, Germany.
- Majorov, A.A. (2009) Digital technologies in radiation control. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 3, 5-12.
- Kokkooi, S., Wrobel, N., Hohendorf, S. et al. (2015) Mobile high-energy X-ray radiography for NDT of cargo containers. *Materials Evaluation*, 73(2), 175-185.

14. Troitsky, V.A. (2015) New possibilities of radiation control of quality of welded joints. *The Paton Welding J.*, 7, 51-55.
15. Liang, L. (2016) The relationship study between penetration thickness ratio and an imaging length in digital radiography. In: *Proc. of 19th World Conf. on Non-Destructive Testing*, 13-17 June, Munich, Germany.
16. Vieyra, M. (2016) Development of a tangential neutron radiography system for monitoring the fatigue cracks in hydrogen fuel tanks. In: *Proc. of 19th World Conf. on Non-Destructive Testing*, 13-17 June, Munich, Germany.
17. Duerr NDT GmbH and Co. KG, <http://duerr-ndt.de/ru/product>.
18. Yatsenko, S.Ya., Kokorovets, Yu.Ya., Lozenko, A.P. et al. (2015) X-ray television systems Polyscan. *Tekhnich. Diagnostika i Nerazrush. Kontrol*, 1, 60-62.
19. Majorov, A.A. (2007) X-ray television in industrial NDT. *V Mire Nerazrush. Kontrolya*, 1(35), 4-9.
20. Shilo, D.S., Mikhajlov, S.R., Pisarenko, L.D. (2016) Quantum efficiency of detection of digital X-ray television systems on the base of scintillation screens and CCD matrices. *Nerazrush. Kontrol i Diagnostika*, 4, 25-37.
21. Troitsky, V.A., Mikhajlov, S.R., Pastovensky, R.O. (2017) X-ray minitechnology based on solid-state detector. *Tekhnich. Diagnostika i Nerazrush. Kontrol*, 1, 25-29.
22. Troitsky, V.A., Mikhajlov, S.R., Bukhensky, V.N. et al. (2014) Flash-radiography of NPP objects on the base of flat panel detectors. *NK-Inform*, 3(63), 6-14.
23. Troitsky, V.O., Karmanov, M.M., Mykhajlov, S.R. et al. (2016) *Device for X-ray television control*. Utility model pat. 111974, Ukraine.
24. Troitsky, V.O. (2017) *Method of X-ray television control of welded joints*. Utility model pat. 113257, Ukraine.

В. О. Троїцький<sup>1</sup>, С. Р. Михайлов<sup>2</sup>, Р. О. Пастовенський<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ЧЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.  
03680, м. Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».  
03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.  
E-mail: fel@kpi.ua

СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ В РАДІАЦІЙНОМУ  
КОНТРОЛІ (Огляд)

Розглянуто перспективний метод отримання цифрового зображення результатів радіаційного контролю без проміжних носіїв даних. Проаналізовано такі переваги флеш-радіографії: висока продуктивність; низька вартість; можливість спостереження з багатьох ракурсів в реальному часі внутрішніх дефектів зварних з'єднань; відсутність проміжних носіїв інформації. Виконано порівняння основних методів отримання цифрових зображень. Запропоновано нову технологію радіаційного контролю на основі малогабаритних напівпровідникових детекторів, яка отримала назву X-ray mini технологія. Бібліогр. 24, рис. 4.

*Ключові слова:* неруйнівний контроль, флеш-радіографія, цифрове зображення, рентгенотелевізійна система, сцинтилятор, твердотільний детектор, внутрішні дефекти зварних з'єднань, X-ray mini технологія

V. A. Troitskiy, S. R. Mikhailov and R. O. Pastovenskiy

<sup>1</sup>E. O. Paton Electric Welding Institute of the NASU.  
11 Kazimir Malevich str., Kiev-150, 03680.  
E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>NTUU «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute».  
37 Pobedy Ave., Kiev-56, 03056.  
E-mail: fel@kpi.ua

CURRENT ACHIEVEMENTS IN RADIATION TESTING  
(Review)

A paper studies a prospective method for obtaining a digital image on results of radiation testing without intermediate data carriers. Advantages of flash-radiography were analyzed, namely high efficiency, low cost, possibility of on-line multiangle monitoring of welded joint internal defects; absence of intermediate data carriers. New radiation testing technology based on small size semi-conductor detectors, named X-ray mini technology, was proposed. 24 Ref., 4 Figures.

*Keywords:* non-destructive testing, flash-radiography, digital image, X-ray TV system, scintillator, solid-state detector, internal defects of welded joints, X-ray mini technology

Поступила в редакцію 04.04.2017

## Международная выставка Weldex/Россварка 2017

10–13 октября 2017 г.

г. Москва, КВЦ «Сокольники»

Тематика выставки:

- ▶ оборудование и материалы для сварки
- ▶ оборудование для резки металла
- ▶ промышленные роботы
- ▶ оборудование и материалы для нанесения защитных и упрочняющих покрытий
- ▶ оборудование для контроля качества сварных соединений
- ▶ инструменты и приспособления для сварочных работ
- ▶ средства индивидуальной и коллективной защиты при проведении сварочных работ
- ▶ оборудование для обработки кромок