



КОНТРОЛЬ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Л.М. ЛОБАНОВ¹, В.А. ЗНОВА², В.А. ПИВТОРАК¹, И.В. КИЯНЕЦ¹

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ГП «Антонов». 03062, г. Киев, ул. Акад. Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Разработана технология контроля коррозионных повреждений в виде утонения и трещин в элементах авиационных конструкций методом электронной широгрaфии, который позволяет выявлять концентрацию напряжений, обусловленную присутствием дефекта или конструктивными особенностями исследуемого объекта. Эффективность использования метода широгрaфии для выявления коррозионных повреждений различных типов, размеров и формы показана в экспериментах как на тестовых образцах, так и на натуральных элементах обшивки фюзеляжа и крыла самолета без демонтажа внутренней облицовки и герметика. Библиогр. 8, рис. 4.

Ключевые слова: неразрушающий контроль качества, диагностика авиационных конструкций, широгрaфия, коррозия

В современных отраслях авиационной промышленности одной из актуальных задач является обеспечение качества и работоспособности элементов и узлов конструкций, которые работают в условиях сложного механического воздействия и температурных градиентов. В летательных аппаратах применяются различные металлические материалы: стали, сплавы алюминия, титана, меди и др. Во многих узлах и агрегатах летательных аппаратов металлические детали контактируют одна с другой и с разнородными жидкостями и газообразными средами, что может привести к коррозионным повреждениям.

Коррозия – один из наиболее опасных видов разрушений металлических элементов авиационных конструкций (летательных аппаратов), поскольку процессы разрушения могут протекать скрытно, например, под накладками или внутри многослойных конструкций. Это приводит к недопустимому уменьшению прочности, а значит и к снижению уровня надежности авиационных конструкций [1–3]. В связи с этим большое внимание уделяется анализу коррозионного состояния конструкций, изучению количественных и качественных закономерностей развития коррозионных процессов в различных условиях эксплуатации и оценке влияния коррозионных повреждений на работоспособность, технико-экономические показатели конструкции. Также актуальным остается развитие методов и средств технической диагностики и прогнозирования ресурса авиационных конструкций [3–5].

В настоящее время для решения задач неразрушающего контроля (НК) применяются различные методы: рентгеновский, ультразвуковой, акустической эмиссии, вихревых токов и др. [1, 3, 4].

Однако в ряде случаев разрешающая способность этих методов недостаточна, кроме того они не позволяют получать информацию одновременно по большим участкам исследуемых объектов.

Перспективным представляется применение для этих целей методов лазерной интерферометрии, отличающихся высокой чувствительностью к поверхностным перемещениям и деформациям, имеющих ряд преимуществ: возможность визуального наблюдения в реальном времени картины интерференционных полос, характеризующей деформацию поверхности; бесконтактностью; возможность применения для исследования объектов сложной формы; отсутствие специальных требований к подготовке исследуемой поверхности [6].

Наиболее эффективным из них является метод электронной широгрaфии, который может использоваться при исследовании различных материалов и конструкций [6]. Следует отметить, что применение на практике обычно используемых методов неразрушающего контроля чаще всего происходит в ненагруженных элементах и узлах конструкций. Электронная широгрaфия, в противоположность этому, работает с нагруженными объектами и в отличие от традиционных методов контроля, которые только фиксируют наличие или отсутствие дефектов, она позволяет выявить концентрацию деформаций (напряжений), вызванную присутствием дефекта или конструктивными особенностями объекта. Интенсивное развитие этого метода в течение последнего десятилетия позволило ему войти в число достаточно широко применяемых методов контроля промышленной продукции [7].

При выполнении неразрушающего контроля качества (НКК) элементов и узлов конструкций ис-

пользуется компактная широкографическая установка, состоящая из одномодового лазера для освещения поверхности исследуемого объекта, широкографического интерферометра, формирующего изображение объекта, CCD-камеры для записи и передачи изображения и компьютера для получения и обработки картин интерференционных полос [8].

При проведении экспериментов с помощью созданной технологии широкографического НКК исследовали элементы обшивки самолета размерами $600 \times 500 \times 1,5$ мм с заложенными с обратной стороны элемента дефектами в виде утонения диаметром 9 и 15 мм. Глубина внесенных дефектов не превышала 50 % толщины элемента обшивки (рис. 1, а, рис.2, а).

НК элемента обшивки выполняли в такой последовательности: исследуемый участок образца освещали лазерным излучением и отраженную световую волну, которая характеризует начальное состояние контролируемой поверхности, записывали с помощью CCD-камеры в память компьютера. После этого контролируемый участок, с целью его деформирования, обдували нагретым воздухом ($T \sim 100$ °С) в течение 2...5 с и записывали в память компьютера отраженную световую волну, которая характеризует нагруженное состояние участка образца. При этом величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси ОХ или ОУ. С помощью специальной компьютерной программы записанную оптическую информацию

обрабатывали до получения широкограммы и распределения производной от перемещений нормальных к поверхности $\partial w/\partial x$ или $\partial w/\partial y$ вдоль выбранного сечения.

На рис. 1 и 2 приведены результаты широкографического контроля качества элемента обшивки самолета. Локальное изменение величины и знака производных $\partial w/\partial x$ и $\partial w/\partial y$ вдоль исследуемых сечений А-А и В-В характеризует наличие дефекта в контролируемом участке элемента обшивки.

Были выполнены исследования и эксперименты по контролю качества усиливающих элементов авиационных конструкций, изготовленных из сплава В95-Т, размерами $350 \times 30 \times 5$ мм с целью выявления коррозионных трещин. Исследуемый усиливающий элемент (рис. 3, а) закреплялся в механическом нагрузочном устройстве, которое позволяло незначительно изогнуть его по нормали к поверхности, что приводило к большому раскрытию коррозионной трещины. После этого контролируемый участок освещали лазерным светом и отраженная световая волна, характеризующая начальное состояние поверхности усиливающего элемента, записывалась в память компьютера. Величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси ОУ. Затем исследуемый участок поверхности обдувался потоком горячего воздуха с температурой 150 °С в течение 20 с и в компьютер записывалась световая волна, характеризующая деформированное состояние контро-

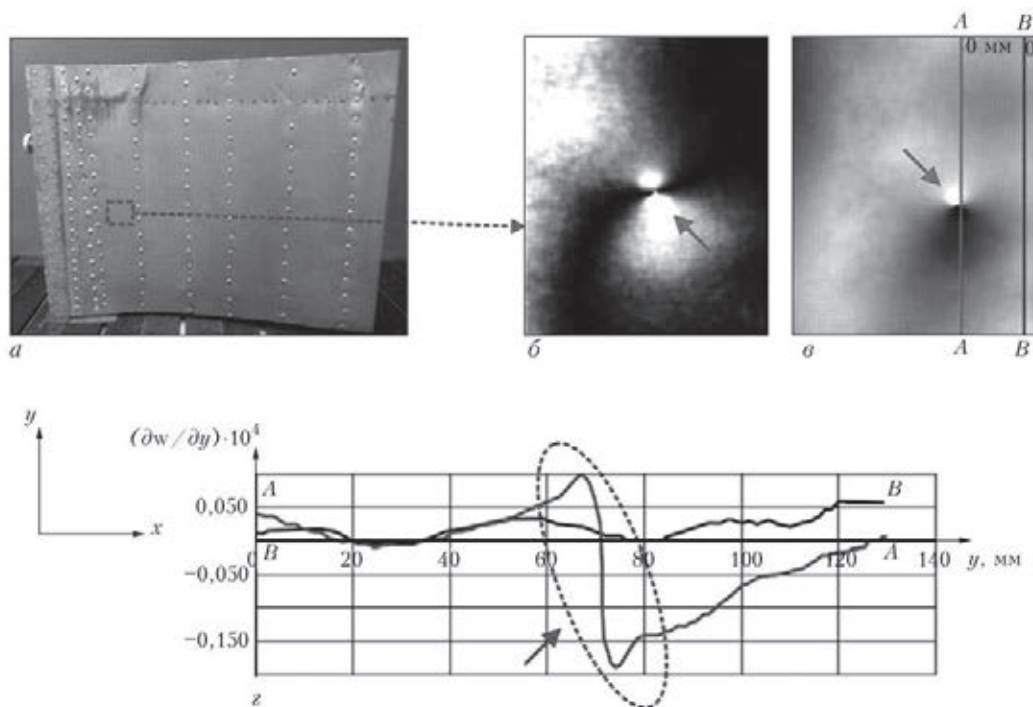


Рис. 1. Ширографический контроль элемента обшивки с внесенным дефектом ($\varnothing 9$ мм) с использованием в качестве нагружения обдува горячим воздухом ($T \sim 100$ °С в течение 2 с) на стадии охлаждения: а – общий вид элемента с выделенным участком контроля; б – интерференционная картина контролируемого участка; в – поверхность деформирования контролируемого участка с выбранными сечениями А-А и В-В; г – кривые распределения производной $\partial w/\partial y$ вдоль выбранных сечений (В-В – сечение бездефектной зоны; А-А – сечение с зоной дефекта, указанной стрелкой)

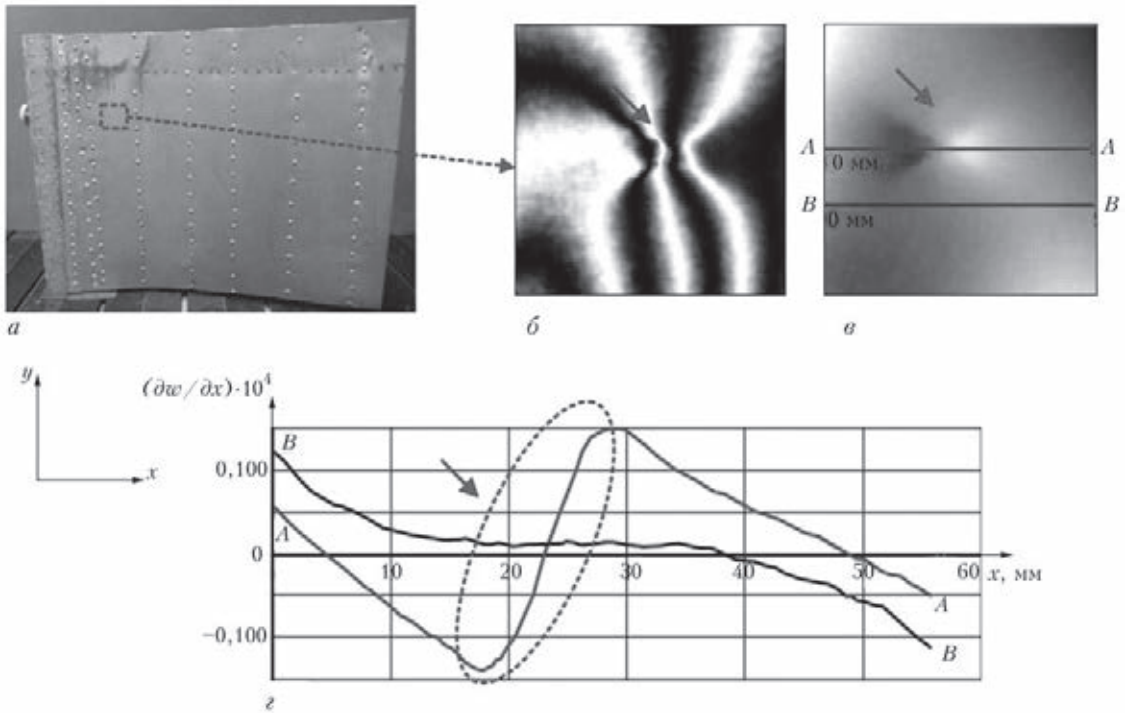


Рис. 2. Ширографический контроль элемента обшивки с внесенным дефектом ($\varnothing 15$ мм) с использованием в качестве нагрузки обдува горячим воздухом ($T \sim 100$ °С в течение 5 с) на стадии нагрева: *a* – общий вид элемента с выделенным участком контроля; *б* – интерференционная картина контролируемого участка; *в* – поверхность деформирования контролируемого участка с выбранными сечениями *A-A* и *B-B*; *г* – графики распределения производной $\partial w/\partial x$ вдоль выбранных сечений (*B-B* – сечение бездефектной зоны; *A-A* – сечение с зоной дефекта, указанной стрелкой)

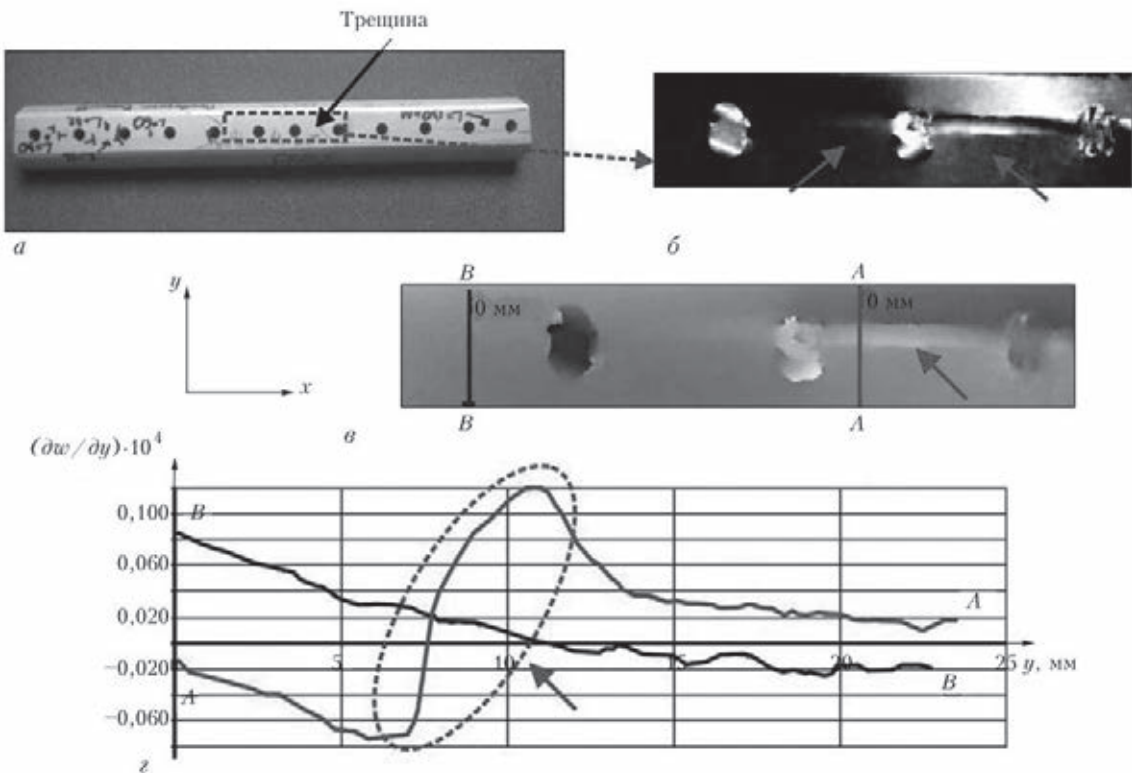


Рис. 3. Ширографический контроль усиливающего элемента авиационных конструкций с коррозионной трещиной с использованием в качестве нагрузки обдува горячим воздухом ($T \sim 150$ °С в течение 20 с) на стадии нагрева: *a* – общий вид элемента с выделенным участком контроля; *б* – интерференционная картина контролируемого участка; *в* – поверхность деформирования контролируемого участка с выбранными сечениями *A-A* и *B-B*; *г* – распределение производной $\partial w/\partial y$ вдоль выбранных сечений (*B-B* – сечение бездефектной зоны; *A-A* – сечение с зоной дефекта, указанной стрелкой)

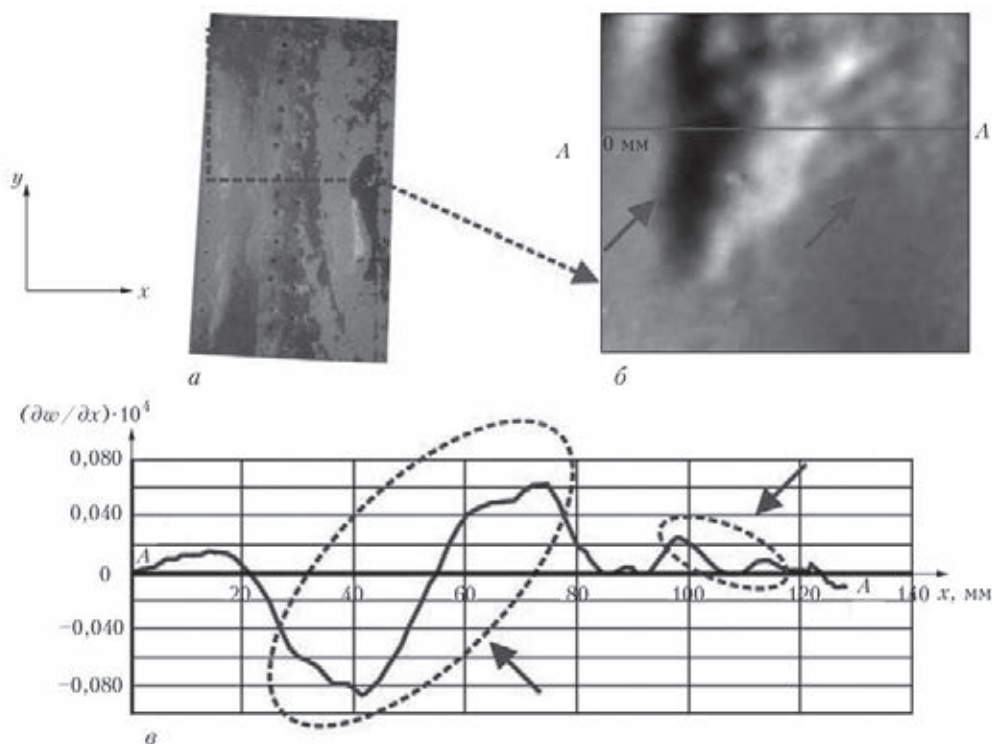


Рис. 4. Ширографический контроль биметаллического элемента с коррозионным расслоением с использованием в качестве нагрузки обдув теплым воздухом ($T \sim 50$ °С в течение 5 с) на стадии нагрева: *a* – общий вид элемента с выделенным участком контроля; *б* – поверхность деформирования контролируемого участка с выбранным сечением *A–A*; *в* – распределение производной $\frac{dw}{dx}$ вдоль выбранного сечения *A–A* (слева – большая зона расслоения, справа – малая зона коррозионного повреждения без полного расслоения, обе выделены пунктиром и указаны стрелками)

лируемого участка поверхности элемента. После обработки в компьютере записанной оптической информации, как и в предыдущем эксперименте, получали результаты широкографического контроля качества усиливающего элемента (рис. 3). Резкий локальный скачок в распределении производной $\frac{dw}{dx}$ вдоль выбранных сечений характеризует наличие дефектного участка (отмечено стрелкой).

С применением технологии широкографического НКК выполнялись также эксперименты по выявлению коррозионных повреждений в биметаллических образцах из сплава Д16 и титана размерами $300 \times 170 \times 1$ мм. В процессе эксплуатации таких элементов возникали внутренние коррозионные повреждения на границе слоев алюминия (Д16) и титана в виде расслоения.

Для нагружения контролируемого образца использовали обдув воздухом, нагретым до 50 °С в течение 5 с. При выполнении экспериментов величина широдвига составляла 5 мм вдоль направления оси *OX*. Полученные результаты, характеризующие деформирование контролируемого образца вдоль выбранного сечения, приведены на рис. 4. Локальные изменения величины и знака производной $\frac{dw}{dx}$ вдоль выбранного сечения *A–A*, характеризуют наличие коррозионного повреждения на границе слоя Д16-титан (рис. 4, в).

Проведенные исследования и эксперименты подтверждают эффективность применения мето-

да электронной широкографии для выявления различных типов коррозионных дефектов (утонение, расслоение, трещина) в элементах и узлах авиационных конструкций.

Выводы

Ширография применяется как оперативный и надежный метод контроля тонколистовых элементов конструкций, изготовленных из металлических материалов. Метод может использоваться на всех стадиях контроля: от процесса производства конструкций до их эксплуатации, как при техническом обслуживании, так и при их ремонте.

Важным преимуществом электронной широкографии при проведении НК качества объектов является то, что в отличие от традиционных методов контроля, которые только фиксируют наличие или отсутствие дефектов, метод широкографии позволяет выявлять концентрацию напряжений, которая обусловлена присутствием дефекта или конструктивными особенностями исследуемого объекта.

Проведенные исследования и эксперименты позволили с применением электронной широкографии выявить внутренние дефекты в элементах обшивки фюзеляжа и крыла самолета без демонтажа внутренней облицовки и герметика. При проведении экспериментов с использованием термического нагружения в исследуемых элементах были выявлены дефекты как в виде утонения и расслоения, так и в виде трещин.



1. Fahr A. Aeronautical Applications of Non-destructive Testing // Canada. – 2014. – P. 82–85.
2. Ball D. L. The Role of Nondestructive Testing in Aircraft Damage Tolerance // Materials Evaluation. – 2003. – № 7. – P. 814–818.
3. NDE of Composite Structures using Ultrasonic, Thermography and Laser Shearography / M. Genest, M. Brothers, R. LeBlanc, A. Fahr // Proc. of SAMPE Conference, Seattle, WA, May 17–20, 2010.
4. Pulsed Thermography and Laser Shearography for Damage Growth Monitoring / M.Genest, R.S. Rutledge, R. Koteri et al. // Proc. of the International Workshop on Smart Materials, Structures & NDT in Aerospace, Montreal, Quebec. – Canada, Nov. 2–4, 2011.
5. Игнатович С. Р. Надежность выявления трещин при неразрушающем контроле авиационных компонентов // Дефектоскопия. – 2013. – 49, №5. – С. 69–76.
6. Steinchen W., L. Yang L. Digital Shearography Theory and Application of Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry // SPIE – The International Society of Optical Engineering, Bellingham, Washington, 2003.
7. ASTM Standard Practice E-2581-7 Shearography of Polymer Matrix Composites, Sandwich Core Materials and Filament-Wound Pressure Vessels in Aerospace Application. – <http://www.astm.org/Standard/index.shtml>.
8. Технология неразрушающего контроля качества элементов и узлов авиационных конструкций методом электронной ширографии / Л.М. Лобанов, В.А. Знова, В.А. Пивторак, И.В. Киянец // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2014. – № 3. – С. 15–18.

Technology of monitoring corrosion damage in the form of thinning and cracks in aircraft structure elements by the method of electron shearography was developed. The method allows revealing stress concentration, due to presence of defects or structural features of the studied object. Effectiveness of shearography application to detect corrosion damage of various types, dimensions and shape, is demonstrated in experiments both on test samples and on full-scale elements of airframe skin and aircraft wing without dismantling the internal facing or sealant. 8 References, 4 Figures

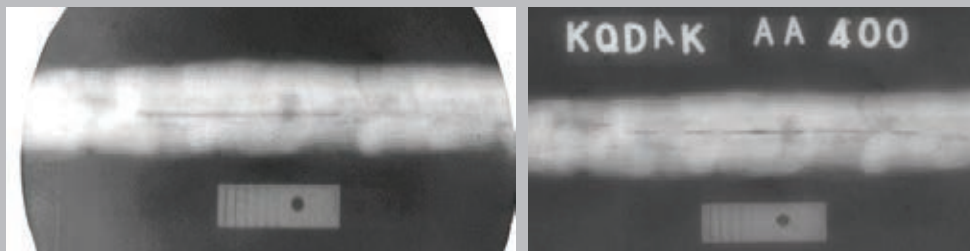
Key words : nondestructive quality testing, quality, aircraft structure diagnostics, shearography

Поступила в редакцию
07.04.2015

ФЛЭШ-РАДИОГРАФИЧЕСКИЕ ЦИФРОВЫЕ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ПОРТАТИВНЫЕ РЕНТГЕНТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ВМЕСТО ПЛЕНОЧНОЙ РЕНТГЕНОГРАФИИ

Для обнаружения внутренних дефектов создана портативная рентгентелевизионная аппаратура и технология, заменяющие пленочную радиографию. Впервые мгновенная (флэш) рентгентелевизионная информация в электронном виде передается по интернету или в записи на портативное запоминающее устройство (флэшку). В флэш-радиографических системах применяются высокочувствительные цифровые портативные астрологические камеры, высоко эффективные рентгеновские экраны. Такие мобильные рентгентелевизионные системы (масса до 15 кг) имеют размер рабочего поля 120...200 мм, обеспечивают чувствительность контроля 0,8...1 % и разрешающую способность до 5 пар лин./мин. По скорости, стоимости, производительности новая технология на порядок эффективнее, чем пленочная радиография. Портативные флэш-рентгентелевизионные системы обеспечены алгоритмами для обработки и архивирования изображений, а также измерения размеров дефектов. Для создания таких систем используются технические средства, имеющиеся у заказчика, т.е. переход от традиционной пленочной радиографии к новой технологии не вызывает особых проблем.

Демонстрация возможностей флэш-радиографии на объектах заказчика выполняется бесплатно, при этом оказывается помощь в подготовке технических заданий с учетом имеющихся у заказчика: рентген-аппаратов, штативов, эталонов, ноутбуков и т.п. На рисунках для сравнения показаны фрагменты снимков с экрана ноутбука и результат пленочной радиографии.



ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины
E-mail: office@paton.kiev.ua