

УДК 620.192.63

А.В. Степанов¹, Е.И. Косарина¹, А.А. Демидов¹**КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ФОТОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПЛАСТИН**

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-79-85

Приведены результаты изучения физических основ детектирования радиационных изображений, в которых важную роль играют ионные кристаллы с добавкой определенных примесей, известных как фотостимулируемые фосфоры. Они преобразуют энергию первичной заряженной частицы или рентгеновского фотона в фотоны видимого или близкого к видимому ультрафиолетового диапазона. Сохраненная энергия освобождается термической или оптической стимуляцией, которая приводит к свечению в видимом диапазоне энергий. Приведена информация об опробовании аппаратно-программного комплекса для рентгеновского контроля объектов авиационной техники. Полученные в результате опробования данные по достижимой чувствительности контроля, выявляемости искусственных и натуральных дефектов, производительности и себестоимости контроля сравнивали с соответствующими результатами, полученными при рентгенографическом контроле. Определена область возможного применения аппаратно-программного комплекса при рентгеновском неразрушающем контроле.

Ключевые слова: рентгенографический, рентгеноскопический контроль, эталонные рентгенограммы, дефект, уровни качества, пластины с фотостимулированной памятью.

The article presents the results of research into the physical foundations of detection of radiation images in which ionic crystals with the addition of certain impurities, also known as photostimulated phosphors, play an important role. The photostimulated phosphors transform energy of the primary charged particles or X-ray photon into visible or ultraviolet spectrum. Saved energy is released by means of thermal and optical stimulation that leads to the light emission in the visible spectrum. The article gives the information about testing of hardware-software complex for X-ray control of the aircraft. Testing results including such parameters as attainable sensitivity of control, resolution limit, detectability of artificial and natural defects, cost and performance are compared with the corresponding results obtained by radiographic control. The area of possible application of the hardware-software complex for X-ray non-destructive control of aircraft was defined.

Keywords: radiography, radioscopy testing, standard X-ray images, flaws, quality levels, CR-plates.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Производство узлов и деталей авиационной техники [1–4] непременно сопровождается проведением стопроцентного неразрушающего контроля, в частности рентгеновского с применением радиографической пленки [5]. Существенными недостатками рентгенографической дефектоскопии являются высокие трудоемкость контроля, связанная с фотообработкой экспонированной радиографической пленки, и себестоимость. Замену рентгенографии альтернативной ей рентгеноскопией в условиях производства осуществляют частично (в ограниченном объеме) из-за присущих ей недостатков, связанных, в первую очередь, с низкой чувствительностью контроля, ограничением по диапазону энергии рентгеновского излучения и других [6].

К новым разработкам в области рентгеновского неразрушающего контроля относятся программно-аппаратные комплексы, в основе которых

заложен метод так называемой компьютерной радиографии (CR), где вместо пленки для получения изображения применяются специальные гибкие пластины многократного использования [7–9]. Важную роль в детектировании радиационных изображений играют ионные кристаллы с добавкой определенных примесей. Они преобразуют энергию первичной заряженной частицы или рентгеновского фотона в фотоны видимого или близкого к видимому ультрафиолетового диапазона, т. е. они сцинтиллируют. Некоторые кристаллы вдобавок к сцинтилляционной активности запасают часть поглощенной энергии в кристаллической структуре [10, 11]. Сохраненная энергия освобождается термической или оптической стимуляцией, которая приводит к свечению в видимом или близком к видимому диапазоне энергий. Известные фотостимулируемые фосфоры – щелочные галоиды RbBr(Tl) и CsI(Na), щелочноземельные фторгалоиды BaFX (X – Cl, Br, I) и суль-

фиды MeS (Me – Mg, Ca, Sr, Ba) с примесями Ce и Sm или Eu и Sm, или Bi (Seggern 1989). В наиболее эффективных запоминающих фосфорах значительная доля поглощенной энергии от ионизирующей частицы запасается на метастабильных уровнях, называемых «центрами окраски». Освещение кристалла с предварительно созданными центрами окраски светом определенной длины волны, обычно в красной области, переводит электроны в зону проводимости. После рекомбинации с дырочными центрами энергия передается активатору и происходит испускание света, характерного для активатора. Материал $BaFBr:Eu^{2+}$, обладающий способностью фотостимулированной люминесценции, используется в качестве нового запоминающего детектора рентгеновского излучения. Такой детектор представляет собой пластину с нанесенным на нее слоем фотостимулированного материала.

Процесс экспонирования осуществляют так же, как при использовании радиографической пленки (рис. 1).

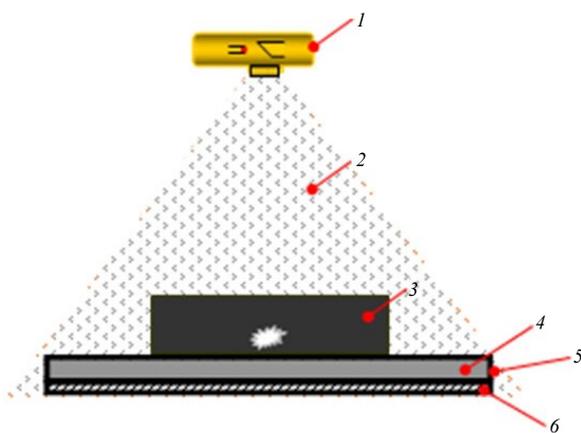


Рис. 1. Экспонирование объекта контроля на фотостимулируемую пластину: 1 – источник излучения; 2 – рентгеновское излучение; 3 – объект контроля; 4 – фотостимулируемая пластина; 5 – защитная кассета; 6 – экран для защиты от обратнорассеянного излучения

Скрытое изображение, зарегистрированное на пластине, может быть считано сканирующей системой и воспроизведено на мониторе компьютера (рис. 2). Считывание проводят посредством инфракрасного лазера, вызывающего эффект фотостимулированной люминесценции.

В настоящее время фирмы, производящие радиационную дефектоскопическую технику, предлагают аппаратно-программные комплексы (АПК) для компьютерной радиографии различных модификаций, например, HD-CR 35 NDT, Fuji FCR 5000, plusRDI COBRASCAN, GEIT (AGFA) RADVIEW CR100 [8, 9, 11], использующие в качестве детектора рентгеновского излучения пластину с фотостимулированной памятью (ФСП) многократного использования (рис. 3).

Материалы и методы

Описание исследований аппаратно-программного комплекса и сравнение свойств фотостимулированных пластин со свойствами радиографической пленки

Программа исследований заключалась в определении оптимальных режимов и параметров контроля, максимально достижимой чувствительности и предела разрешения. Исследования проводили, используя аппаратно-программные комплексы CR 35 NDT, HD-CR 35 NDT, HD-CR 43 NDT [12].

Исследования сенситометрических свойств пластины с ФСП

Известно, что качество получаемого на радиографической пленке изображения зависит от свойств самой пленки, отраженных на ее характеристической кривой (ХК), – зависимости оптической плотности от десятичного логарифма экспозиции (относительной экспозиции) [12]. Аналогом ХК для фотостимулированной пластины является зависимость яркости изображения на мониторе от экспозиционной дозы излучения. Яркость изображения, которая видна на мониторе, – совокупный результат физических процессов, происходящих в фотостимуляторе $BaFBr:Eu^{2+}$ и являющихся входным воздействием в компьютер, с одной стороны, и преобразования этих процессов по определенной программе на экране монитора в картинку объекта контроля (ОК) в виде распределения яркости на экране монитора, с другой стороны. Зависимость яркости экрана монитора от экспозиционной дозы излучения, адекватная ХК радиографической пленки, построена экспериментально [13]. Схема экспонирования радиографической пленки и пластины с ФСП показана на рис. 4.

Аналогично экспонированию радиографических пленок (рис. 4) проведено экспонирование пластин с ФСП и построены зависимости в осях «сигнал в относительных единицах–логарифм дозы излучения» (рис. 5). Для адекватного сравнения сенситометрических свойств радиографической пленки и пластины с ФСП на рис. 5 приведены графики, соответствующие радиографическим пленкам D5 и D7, полученные путем оцифровки рентгенограмм [14, 15]. Из представленных графиков видно, что контрастные свойства пластины с ФСП ниже, чем у радиографических пленок D5 класса C4 и D7 класса C5 (EN 584-1:2006). При этом чувствительность к излучению у пластины с ФСП выше [15].

Исследования дефектоскопических свойств пластины с ФСП

Объекты исследований – детали авиационной техники из сплавов на основе титана, алюминия, магния, железа и жаропрочных сплавов на основе никеля.

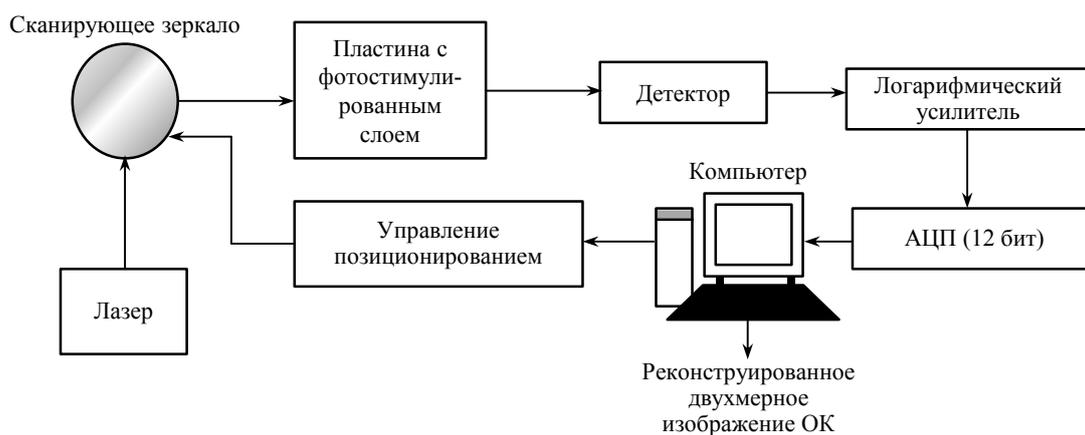


Рис. 2. Блок-схема формирования изображения с использованием фотостимулированных пластин



Рис. 3. Внешний вид аппаратно-программного комплекса

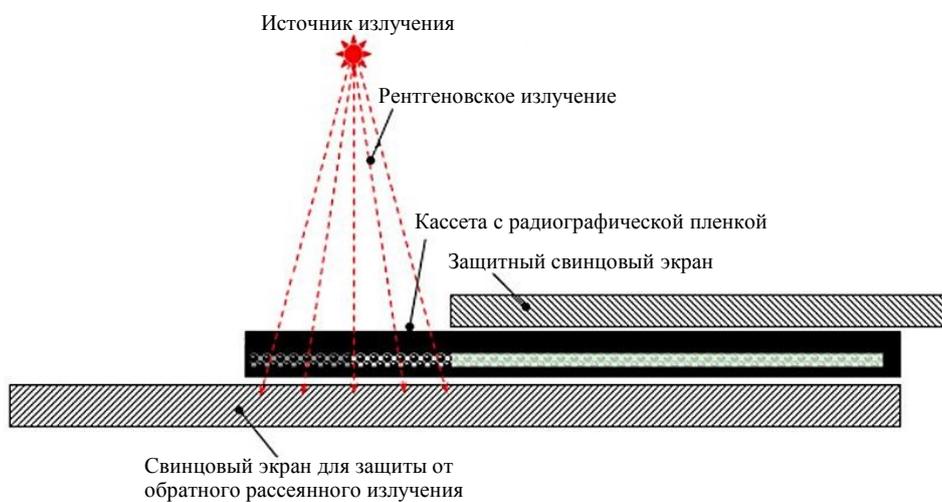


Рис. 4. Схема экспонирования радиографической пленки и пластины с ФСП

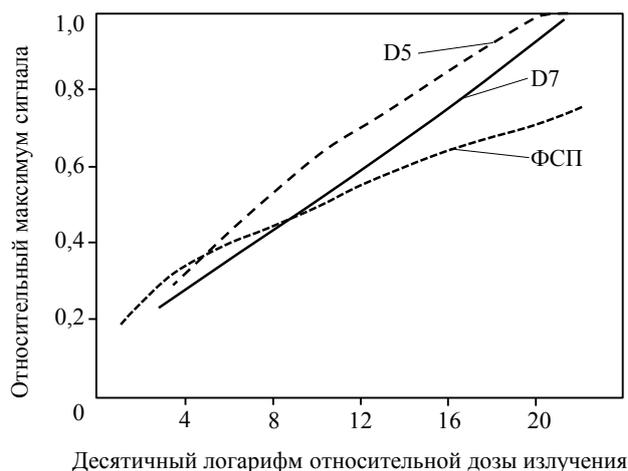


Рис. 5. Объединенные графики характеристических кривых оцифрованных радиографических пленок D5, D7 и пластины с ФСП, полученных при экспонировании с анодным напряжением 80 кВ

Таблица 1

Характеристики металлических клиньев

Материал	ЖС26	ВТ6	АЛ9-1
Толщина, мм	0,5–30	1–60	1–20

Таблица 2

Режимы контроля объектов для радиографической пленки D5 и пластины с ФСП

Параметры объекта контроля		Режим контроля с преобразователем типа					
		радиографической пленки D5			пластины с ФСП		
сплав	толщина, мм	U, кВ	I, мА	t, с	U, кВ	I, мА	t, с
ЖС26	0,5–3	80	10	90	80	10	20
	5–8	120	10	90	120	10	20
	15–20	200	10	90	200	10	20
	25–30	260	10	90	260	10	20
ВТ6	1–8	80	10	90	80	10	20
	10–14	120	10	90	120	10	20
	20–45	200	10	90	200	10	20
	50–60	260	10	90	260	10	20
АЛ9-1	1–5	20	10	60	20	10	15
	5–8	35	10	60	35	10	15
	10–20	55	10	60	55	10	15

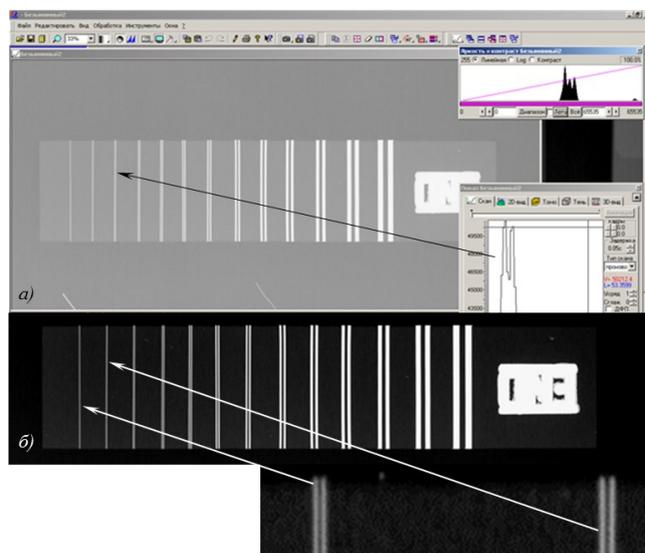


Рис. 6. Внешний вид двухпроволочного индикатора на пластине с ФСП (а) и рентгенографической пленке (б)

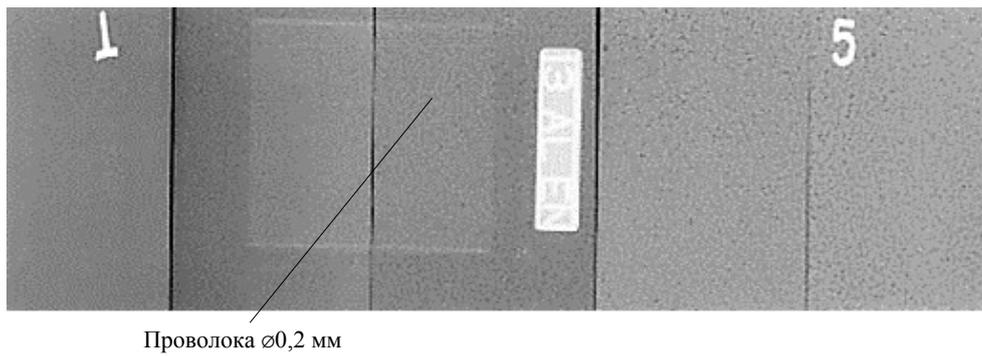


Рис. 7. Изображение шкалы эталонов пористости образцов толщиной 5 мм из сплавов типа «силумин», полученное с помощью программно-аппаратного комплекса HD-CR 35 NDT

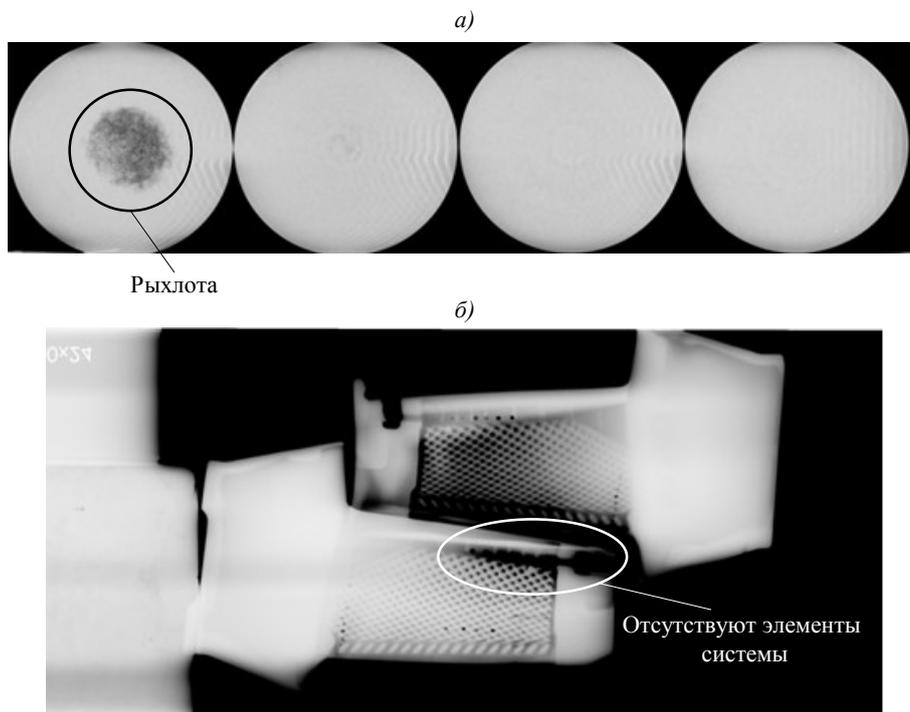


Рис. 8. Рентгеновские изображения отливок из стали с рыхлотой (а) и лопаток из жаропрочного сплава с дефектами внутренней полости (б)

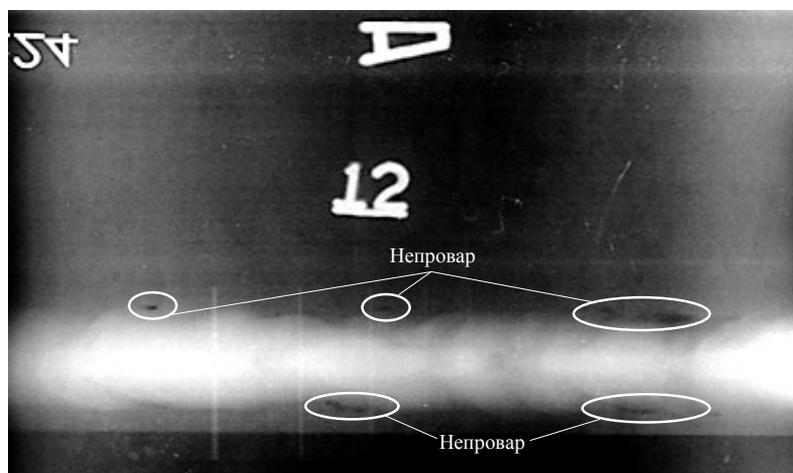


Рис. 9. Изображение сварного стыкового соединения из стали Ст20 толщиной 6 мм, полученное с помощью программно-аппаратного комплекса HD-CR 35 NDT

Таблица 3

Основные этапы контроля и временные затраты на их выполнение

Этап контроля	Продолжительность контроля	
	радиографического при ручной обработке экспонированной пленки	на основе программно-аппаратного комплекса HD-CR 35 NDT с преобразователем типа пластин с ФСП
Подготовка	Зарядка пленки 2–5 мин	Очистка пластины 30–90 с
	Разметка и установка объекта контроля 6–12 мин	
Экспонирование	1–6 мин	10–90 с
Обработка	Проявление 6 мин Фиксирование 12 мин Промывка 20 мин Сушка 3 мин	Сканирование 30–90 с (в зависимости от установленного разрешения)
Общая продолжительность контроля	50–64 мин	7–19 мин

Для перечисленных сплавов построены номограммы экспозиций (НЭ) в диапазоне анодного напряжения на рентгеновской трубке, равного 30–250 кВ. Классические НЭ представляют собой семейство зависимостей экспозиции $\Sigma = I \cdot t$ (мА·мин) от толщины экспонируемого материала d (мм) при постоянных значениях анодного напряжения U (кВ). При этом фокусное расстояние, равное 700 мм, и оптическая плотность снимка, равная 2 Б, для которой строят НЭ, являются постоянными величинами.

При построении НЭ для пластин с ФСП в качестве аналога оптической плотности использовали заданную величину сигнала, соответствующую яркости изображения на мониторе установки, фокусное расстояние установлено равным 850 мм. Объектами контроля были ступенчатые клинья, выполненные из титанового сплава ВТ6, жаропрочного сплава ЖС26, алюминиевого сплава АЛ9-1 (табл. 1).

Экспонирование образцов проводили на пленку D5 и пластину с ФСП. Затем пластину анализировали в АПК и получали изображение на мониторе. Экспонированную радиографическую пленку подвергали фотообработке, затем рентгенограмму оцифровывали. Изображения, выполненные на радиографической пленке D5 и пластине с ФСП, сравнивали. Результаты показали, что область толщин, контролируемых АПК, соответствует аналогичной области контроля радиографическим методом (табл. 2) [12, 15].

Определение предела разрешения для пластин с ФСП

Разрешающие свойства пластин с ФСП оценивали с помощью дуплексного индикатора качества изображения с наименьшим диаметром элемента 0,05 мм по EN 462-5 (рис. 6) [16–18].

Изображение на пленке D5 имеет предел разрешения 0,05 мм, т. е. изображение пары вольфрамовых проволок диаметром 0,05 мм, расположенных друг от друга на расстоянии 0,05 мм, на плен-

ке D5 воспринимается отдельно; на пластине с ФСП изображение проволок сливается, а отдельно воспринимается изображение проволок диаметром 0,08 мм (рис. 6).

Разработанные режимы опробованы при контроле эталонных образцов с известными дефектами и образцов, представляющих собой фрагменты и готовые детали авиационной техники:

- лопатки турбины из жаропрочного сплава на основе никеля;
- стальные сварные соединения;
- отливки из алюминиевых сплавов различной пористости;
- литые детали из магниевых сплавов с разной степенью микрорыхлоты [19, 20].

Образцы из сплава АЛ9-1 толщиной 5 мм и пористостью с первого по пятый балл представлены на рис. 7. Видно, что различимы третий, четвертый и пятый баллы пористости. Чувствительность по индикатору качества изображения (ИКИ) составляет 0,2 мм (видна первая проволока 13AL EN диаметром 0,2 мм). Достижимая относительная чувствительность составляет 4%, что значительно хуже рентгеновского метода с использованием радиографической пленки.

Стальные отливки и лопатки с дефектами показаны на рис. 8. Хорошо видны крупные дефекты: рыхлота в стальной отливке и отсутствие элементов внутренней полости лопатки.

Сварной шов двух пластин толщиной 6 мм представлен на рис. 9. На снимке видны глубокие непровары, достижимая абсолютная чувствительность по проволочному эталону 12 (ГОСТ 7512–82) составляет 0,25 мм, относительная чувствительность равна 3,5%. С такой чувствительностью допустим контроль сварных соединений 5–7 класса (ГОСТ 23055–78). Рентгенография такого образца на пленку D7 позволяет достичь чувствительности 1,5–2%. Контроль ответственных изделий с помощью программно-аппаратных комплексов недопустим.

Результаты и заключение

При эксплуатации программно-аппаратных комплексов, в частности HD-CR 35 NDT, выявлены следующие недостатки:

– при расшифровке изображений наблюдается сильная засветка неэкранированных участков пластины, что приводит либо к необходимости проведения неоднократного стирания пластины, либо к необходимости изготовления специальных экранирующих приспособлений;

– неполное стирание изображения объекта контроля, которое может проявиться при последующих экспозициях, что затрудняет идентификацию дефектов и может привести к ложному забракованию.

Однако следует отметить преимущество программно-аппаратного комплекса с преобразователем типа пластин с ФСП – этот контроль более производительный. Временные затраты на проведение контроля представлены в табл. 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.
2. Каблов Е.Н., Морозов Г.А., Крутиков В.Н., Муравская Н.П. Аттестация стандартных образцов состава сложнелегированных сплавов с применением эталона //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 9–11.
3. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 36–51.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные никелевые сплавы для перспективных авиационных ГТД //Технология легких сплавов. 2007. №2. С. 6–16.
5. Косарина Е.И., Степанов А.В. Неразрушающий контроль //Большая Российская энциклопедия. Т. 22. М.: Изд-во БРЭ. 2013. С. 487–488.
6. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А., Усачев В.Е. Макро- и микропористость в сплавах на основе алюминия и никеля, обнаружение ее рентгеноскопическими методами неразрушающего контроля //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 423–430.
7. Korner M., Weber Ch.H. Advances in Digital Radiography: Physical Principles and System Overview //Radio Graphics. 2009. V. 27. P. 675–686.
8. Rowlands J.A. The physics of computed radiography //Phys. Med. Biol. 2002. V. 47. P. 123–166.
9. Fischbach F., Freund T., Pech M. et al. Comparison of indirect CsI/a:Si and direct a:Se digital radiography: an assessment of contrast and detail visualization //Acta Radiol. 2007. V. 44. P. 616–621.
10. Майоров А.А. Цифровые технологии в неразрушающем контроле //Сфера Нефтегаз. 2009. №9. С. 26–37.
11. Zscherpel U., Ewert U., Bavendiek K.I. Possibilities and Limits of Digital Industrial Radiology: The new high contrast sensitivity technique – Examples and system theoretical analysis. DIR 2007 /In: International Symposium on Digital industrial Radiology and Computed Tomography. Lyon. 2007. P. 3–27.
12. Ложкова Д.С., Степанов А.В., Косарина Е.И. Компьютерная радиография, результаты практических исследований и возможность замены пленочных технологий //Вестник МЭИ. 2011. №3. С. 57–62.
13. Сасанпур М.Т., Косарина Е.И. Рекомендации по выбору анодных напряжений при рентгеновском контроле стальных объектов //Дефектоскопия. 2011. №5. С. 48–53.
14. Ложкова Д.С., Степанов А.В., Косарина Е.И. Компьютерная радиография: результаты практических исследований и возможность замены пленочных технологий /В сб. тезисов докл. XVII Международной науч.-технич. конф. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». М.: МЭИ ТУ. 2011. С. 468–469.
15. Косарина Е.И., Степанов А.В., Усачев В.Е. Рентгеноскопические установки для решения некоторых задач промышленной дефектоскопии /В сб. тезисов докл. XIX Всероссийской науч.-технич. конф. «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Самара. 2011. С. 245–246.
16. ISO 17636-2 Non-destructive testing of welds Radiographic. Part 2. X- and gamma-ray techniques with digital detectors. 2013. (E). 49 p.
17. ISO 16371-1 Non-destructive testing - Industrial computed radiography with storage phosphor imaging plates. Part 1. Classification of systems. 2011(E). 25 p.
18. ASTM E 2445-05 Standard Practice for Qualification and long-Term Stability of Computed Radiology Systems. 2010. 8 p.
19. Степанов А.В. Методы рентгеновского неразрушающего контроля в производстве авиационных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2010. №3. С. 28–32.
20. Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А., Турбин Е.М. Рентгеновский контроль крупногабаритных отливок сложной формы из сплавов группы «силумин» //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 55–58.