

DOI: 10.15593/2224-9982/2015.43.08

УДК 621.384

**Н.Н. Потрахов, К.К. Жамова, В.Б. Бессонов,  
А.Ю. Грязнов, А.В. Ободовский**

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

## **ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассматривается преимущество использования метода микрофокусной рентгенографии при неразрушающем контроле авиационных изделий из полимерных композиционных материалов. Описаны основные типы характерных дефектов изделий, выполненных из полимерных композиционных материалов, а именно: расслоение структуры материала, поры и смоляные карманы, складки, образованные в силу различных причин, представлены их схематичные изображения. Приведены особенности рентгенооптической схемы микрофокусной рентгенографии, заключающиеся в применении источников излучения с размером фокусного пятна менее 100 мкм и реализации съемки с увеличением изображения, для чего объект исследования относится на некоторое расстояние от системы визуализации. Указанные особенности позволяют повысить детализацию и, соответственно, минимизировать размеры обнаруживаемых дефектов при просвечивании. На основе экспериментальных исследований определены рентгенографические признаки основных типов дефектов, характерных для изделий из полимерных композиционных материалов. Описан внешний вид прототипа рентгеновской установки, предназначенной для осуществления неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов на промышленном производстве. Приведены основные технические характеристики разработанного рентгеновского аппарата РАП-200М, используемого в качестве источника излучения при исследованиях. Рассчитаны временные затраты персонала, необходимые для проведения высокоразрешающей рентгеновской съемки и оценки результатов контроля.

**Ключевые слова:** рентгенография, рентгеновский контроль, микрофокусная рентгенография, фокусное пятно, рентгеновская трубка, микрофокусный рентгеновский аппарат, разрешающая способность, композиционные материалы.

**N.N. Potrakhov, K.K. Zhamova, V.B. Bessonov,  
A.Yu. Gryaznov, A.V. Obodovskiy**

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI",  
Saint Petersburg, Russian Federation

## **TECHNOLOGY OF OPERATIVE X-RAY INSPECTION OF PRODUCTS FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS**

The article is devoted to the method of microfocus radiography for nondestructive testing of aviation products from polymeric composite materials. The basic types of characteristic defects of polymer composite parts – namely, the delamination of the material structure, the pores, resin pockets and folds are described. Their schematic views are presented. The features of the x-ray scheme of microfo-

cus radiography are shown. The meaning of this scheme is application of radiation sources with focal spot size of less than 100 micrometers. To realize survey with increasing image of the object of study it is necessary to put it in some distance from imaging system. These peculiarities allow increase the detailing and minimize the dimensions of detected defects. The radiographic findings peculiar to polymer composite products are detected by experiment studies. The aspects of the prototype of x-ray unit designed for non-destructive testing products from polymeric composite materials in industrial production are described. The main technical characteristics of the x-ray unit RAP-200M used in the studies as emission source are given. The time expenditures of personnel to carry out detailed studies and evaluation of the test results are calculated.

**Keywords:** x-radiography, x-ray inspection, microfocus x-ray, focal spot, x-ray tubes, microfocus x-ray source, resolution, composite materials.

## Введение

В настоящее время при производстве продукции в таких ключевых отраслях промышленности, как авиационно-космическая, авто- и судостроительная, химическая, радиоэлектронная и т.д. широко используются полимерные композиционные материалы (ПКМ). В общем случае ПКМ представляют собой некоторый набор армирующих элементов, пропитанных связующим веществом. Армирующие элементы выполняются из синтетических волокон, нитей, жгутов, лент или одно- или многослойных тканей. В качестве связующего вещества используются смолы – эпоксидные, фенолформальдегидные, полиамидные [1].

Использование ПКМ в современной технике, особенно в авиационной, требует учета таких факторов, как анизотропия жесткости и прочности, нелинейный характер деформирования при нагружении, вероятность разрушения вдоль поверхности раздела слоев, а также возможное наличие специфических внутренних дефектов различного характера. Методики, направленные на решение этих задач, могут быть основаны на различных принципах. Одно из направлений относится к математическому моделированию и базируется на использовании моделей механического поведения материалов с соответствующей системой экспериментов для идентификации параметров моделей, методов и алгоритмов решения различных механических задач [2, 3].

Задачи обнаружения внутренних дефектов относятся к методам неразрушающего контроля. На рис. 1 на примере композитного фланца, являющегося одним из наиболее распространенных элементов в авиационных деталях и узлах из ПКМ, показаны основные типы дефектов, которые могут возникать как в процессе изготовления деталей, так и в процессе их эксплуатации: межслоевое расслоение, поры (смоляные карманы) и складки. Наличие подобных дефектов может существенно повлиять на несущую способность конструкции и ее остаточный ресурс [4].

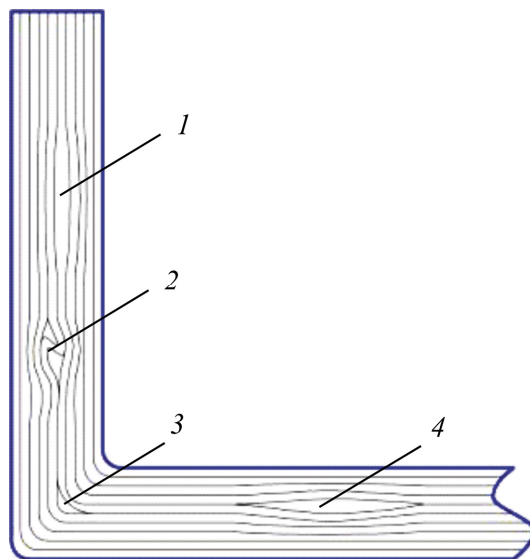


Рис. 1. Возможные типы дефектов во фланцевом соединении деталей из ПКМ: 1, 4 – межслоевое расслоение; 2 – складки; 3 – поры или смоляные карманы

Выявление данных дефектов современными методами неразрушающего контроля не всегда представляется возможным. Соответственно, задача экспресс-оценки качества деталей и узлов из ПКМ при их серийном производстве и в процессе эксплуатации приобретает первостепенное значение.

### Материалы и методы

Одним из перспективных методов исследования в настоящее время является рентгенография, представляющая собой весьма эффективный (наглядный и информативный) способ диагностики [5]. В свою очередь, наиболее распространенным способом получения рентгеновских изображений является контактный способ рентгеновской съемки объектов диагностики. При контактной съемке (рис. 2, а) используется источник рентгеновского излучения 1 с протяженным фокусным пятном  $d_1$ . Объект съемки 2 располагается на достаточно большом расстоянии  $f$  от источника излучения и вплотную (в контакте) к приемнику изображения. Размер фокусного пятна от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Подобное расположение элементов рентгенооптической схемы характерно для методики стандартной рентгенографии [6].

Из приведенной схемы видно, что в условиях стандартной рентгенографии размер фокусного пятна  $d$ , а также расстояние между источником излучения и объектом съемки  $f$  существенно влияют на величину геометрической составляющей нерезкости получаемого изображения. На рис. 2 нерезкость – область «размытия» шириной  $H_r$  выделена более светлым тоном по отношению к основному изображению объекта 2. Удаление приемника изображения от объекта съемки (даже незначительное) приводит к существенному ухудшению качества снимка вследствие увеличения нерезкости  $H_r$  (рис. 2, б).

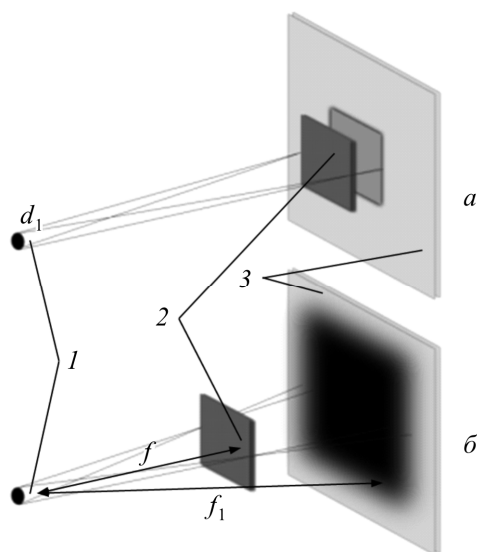


Рис. 2. Геометрическая схема рентгеновской съемки:  
 а – контактная съемка; б – съемка с увеличением  
 изображения

Очевидно, что для уменьшения геометрической составляющей нерезкости изображения при использовании источника излучения с протяженным фокусным пятном необходимо обеспечить минимально возможное расстояние между объектом съемки и приемником изображения. Однако все объекты исследования имеют конечную толщину. Следовательно, перечисленные условия контактной съемки могут быть выполнены лишь в отношении той области объекта, которая непосредственно прилегает к приемнику изображения. В связи с этим для получения резких изображений всех областей объекта целесообразно увеличивать расстояние между объектом съемки и источником излучения

или использовать специальные укладки, например: «передняя-задняя», «задняя-передняя» и т.д. [7].

Очевидно, что традиционный контактный способ получения рентгеновского изображения, при котором объект диагностики располагается в непосредственной близости (в контакте) с приемником изображения и на определенном удалении от источника излучения, для достижения целей контроля авиационных деталей из ПКМ малоинформативен. Сложная и многообразная форма фланцев в большинстве случаев не позволяет приблизить контролируемый участок детали к приемнику изображения, вследствие чего ухудшается резкость получаемых снимков. Кроме того, близкие значения плотности материала армирующих элементов и связующего вещества обуславливают низкий контраст изображения, поэтому снижается вероятность обнаружения и распознавания на рентгеновских изображениях объектов контроля возможных дефектов.

Для решения задачи оперативной высокоинформативной оценки качества деталей из ПКМ может быть применен микрофокусный способ получения рентгеновских изображений. При съемке с увеличением изображения (рис. 3) используется источник излучения с фокусным пятном микронных размеров  $d_2$ , так называемый точечный источник 1. Объект съемки 2 в зависимости от требуемого увеличения изображения может располагаться на определенном расстоянии как от источника излучения, так и от приемника изображения 3. Однако независимо от того, в каком положении находится объект съемки в пространстве между фокусным пятном источника и плоскостью приемника, резкость получаемого изображения будет сохраняться [8]. Величины нерезкости на рис. 3, *a*, *б* практически равны.

Поскольку при реализации описанного способа используются источники излучения с фокусным пятном размером от нескольких десятков микрометров, для его определения используется термин «микрофокусная съемка». Соответственно, рентгенография в перечисленных условиях называется микрофокусной рентгенографией.

В этом случае проявляется ряд особенностей при формировании изображения (эффект увеличения глубины резкости, эффект фазового контраста, псевдообъемный эффект и т.д.) [9], которые обеспечивают принципиально более высокие резкость и контраст рентгеновских снимков. При этом ограничение мощности в существующих микрофо-

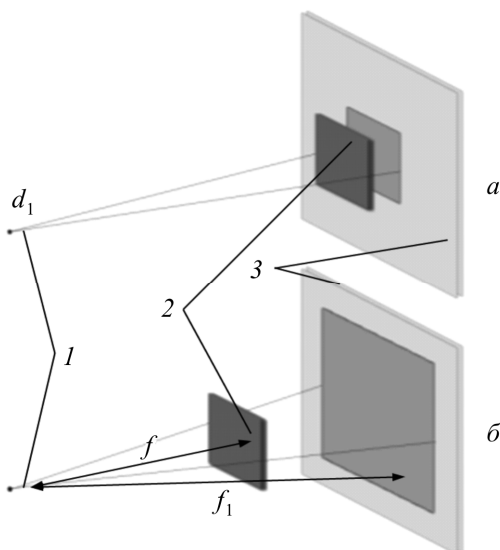


Рис. 3. Рентгенооптическая схема съемки точечным фокусным пятном: *a* – контактный способ; *б* – способ съемки с увеличением изображения

кусных рентгеновских аппаратах несколькими ваттами не имеет особого значения, поскольку плотность ПКМ невысока, а размеры самих деталей относительно невелики.

### Глубина резкости в микрофокусной рентгенографии

1. Основным требованием для получения резких изображений просвечиваемых объектов в рентгенографии является выбор таких условий съемки, при которых геометрическая составляющая нерезкости  $H_{\Gamma}$  сводится к минимуму. На практике можно считать, что величина геометрической нерезкости не должна превышать размеров минимальной характерной детали объекта просвечивания  $x_{\min}$ :

$$H_{\Gamma} \leq x_{\min}. \quad (1)$$

При неразрушающем контроле ПКМ-деталей минимальный характерный размер дефекта может составлять десятые доли миллиметра. В дальнейших расчетах принято  $x_{\min} = 0,1$  мм. Тогда условие получения резкого изображения при съемке может быть записано в следующем виде:

$$H_{\Gamma} \leq 0,1 \text{ мм.}$$

Как известно, величина геометрической нерезкости скрытого рентгеновского изображения детали объекта  $H_r$  определяется геометрическими условиями съемки (рис. 4), а именно размером фокусного пятна рентгеновской трубки  $d$ , расстоянием от фокусного пятна до детали  $f_1$  и расстоянием от детали до плоскости изображения  $f_2$ .

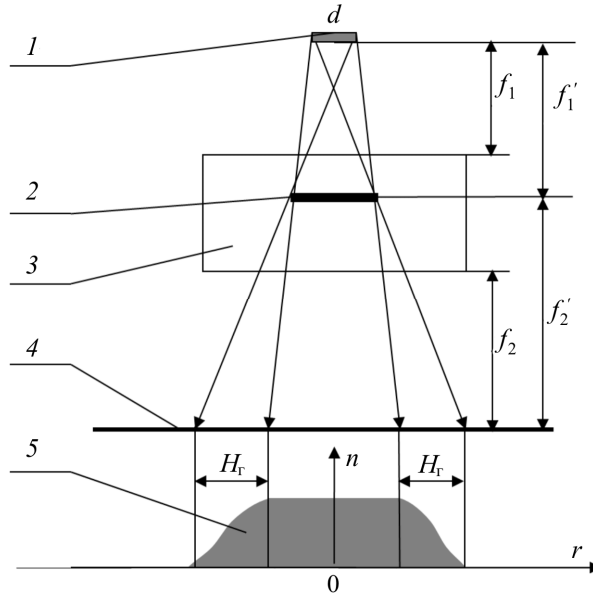


Рис. 4. Механизм возникновения геометрической нерезкости в рентгенографии: 1 – фокусное пятно; 2 – деталь; 3 – объект; 4 – плоскость приемника излучения; 5 – эпюра плотности почернения изображения детали

Перечисленные параметры связаны между собой следующим соотношением:

$$H_r = d \cdot \frac{f_2}{f_1}. \quad (2)$$

Реальные объекты съемки имеют конечную толщину, в большинстве случаев довольно значительную и соизмеримую с величиной фокусного расстояния. Поэтому на практике приходится учитывать расстояние от фокусного пятна до «передней» поверхности объекта  $f_1$  и расстояние от «задней» поверхности объекта до приемника изображения  $f_2$  (рис. 5).

Ниже представлены результаты оценки по выражению (2) средней величины геометрической нерезкости изображения объекта круглой фор-

мы с расположенной в центре деталью. Диаметры объекта и детали составляют 100 и 10 мм соответственно. Дефект располагается в плоскости горизонтального сечения объекта на высоте 50 мм (см. рис. 5). Анализируется контактный способ съемки ( $f_2 = 0$ ), размер фокусного пятна  $d = 1$  мм.

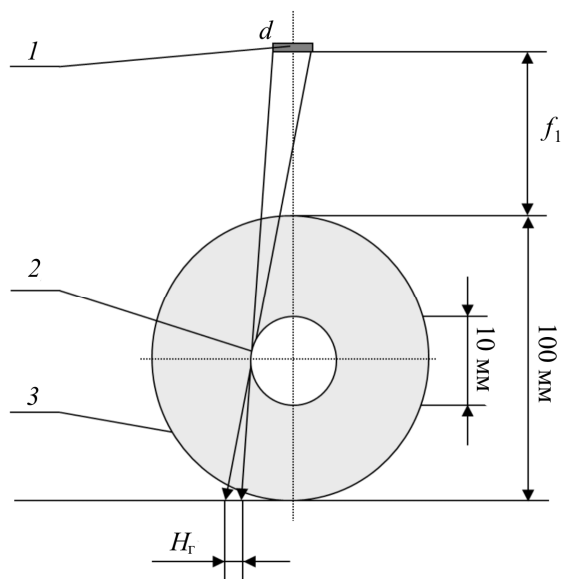


Рис. 5. Расчет величины геометрической нерезкости изображения при контактном способе съемки в стандартной рентгенографии:  
 1 – фокусное пятно; 2 – деталь; 3 – объект; 4 – плоскость приемника излучения

Средняя величина геометрической нерезкости при контактном способе съемки стандартной рентгенографии:

$f_1$ , мм	100	200	300	400	500
$H_{г.сп}$ , мм	0,33	0,20	0,14	0,11	0,09

Приведенные данные показывают, что только на расстоянии более 500 мм величина нерезкости изображения удовлетворяет условию (1). Это служит теоретическим обоснованием факта съемки объектов на стационарных рентгеновских аппаратах контактным способом с фокусного расстояния не менее 500–1000 мм (в зависимости от размеров объекта). Использование в стандартной рентгенографии рентгеновских трубок с достаточно большими фокусными пятнами (от 0,5 мм и выше) на практике приводит к тому, что даже незначительное удаление при-



емника излучения от объекта ( $f_2 > 0$ ) значительно ухудшает информативность снимка вследствие возникающей нерезкости изображения.

2. Чтобы охарактеризовать возможности контактного способа рентгенографии при получении увеличенного изображения объектов съемки, можно использовать понятие глубины резкости  $\Delta F$ . В данном случае под глубиной резкости  $\Delta F$  понимается диапазон расстояний  $f_2$  между объектом и приемником излучения, в котором сохраняется требуемая резкость изображения при условии фиксированного расстояния между фокусным пятном источника излучения и объектом съемки ( $f_1 = \text{const}$ ) (рис. 6):

$$\Delta F_{f_1 = \text{const}} = f_{2\text{max}} - f_{2\text{min}}.$$

При контакжном способе съемки выражение для оценки глубины резкости в рентгенографии примет вид

$$\Delta F = f_{2\text{max}}, \quad (3)$$

поскольку объект лежит на приемнике, то  $f_{2\text{min}} = 0$ .

Естественно, что выражение (3) имеет смысл при выполнении условия «резкости», когда геометрическая нерезкость изображения объекта на максимальном расстоянии  $f_2$  от приемника не превышает размеров минимальной характерной детали объекта  $H_{\Gamma|f_{2\text{max}}} \leq x_{\text{min}}$ .

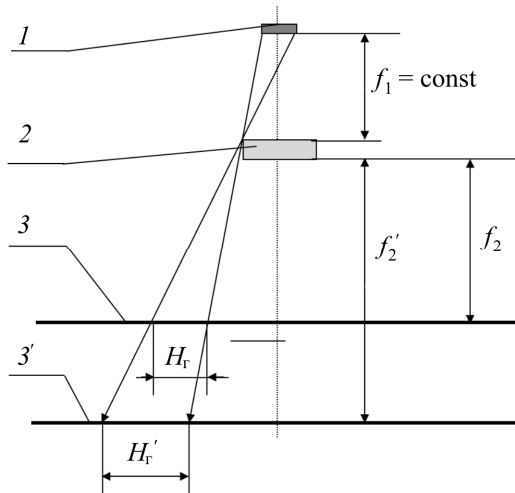


Рис. 6. Определение глубины резкости  $\Delta F$  в рентгенографии:  
 1 – фокусное пятно; 2 – объект; 3 и 3' – плоскость изображения объекта

С учетом вышесказанного результаты расчета геометрической нерезкости при контактном способе съемки аппаратами с протяженным фокусом пятном позволяют сделать вывод, что глубина резкости в стандартной рентгенографии практически отсутствует. Расчет, выполненный для объекта исследования и схемы съемки, изображенных на рис. 5, по выражению (2) показывает, что величина средней геометрической нерезкости изображения при фокусном пятне  $d = 0,1$  мм и расстоянии между фокусным пятном и поверхностью объекта  $f_1 = 100$  мм составляет

$$H_{г.ср} = d \frac{f_1}{f_2} = 0,1 \cdot \frac{50}{150} = 0,033 \text{ мм.}$$

В соответствии с условием получения резкого изображения (1) приемник может быть удален от объекта не более чем на 100 мм ( $H_{г.ср}$  в этом случае составит 0,1 мм). Следовательно, при описанных условиях съемки глубина резкости  $\Delta F$  для микрофокусного способа составляет 100 мм. На практике размер фокусного пятна используемых источников излучения составляет 20–40 мкм, поэтому реальное значение глубины резкости при микрофокусной съемке значительно больше.

Полученное при описанных выше условиях съемки изображение объекта будет увеличено в два раза по сравнению с его истинными размерами, поэтому в рентгенографической практике для оценки глубины резкости иногда удобнее использовать отношение расстояний  $f_{2\max}$  и  $f_1$ . В этом случае понятие глубины резкости будет характеризоваться средним увеличением объекта:

$$m_{ср} = \frac{f_{2\max}}{f_1} = \Delta F,$$

при котором сохраняется условие получения резкого изображения в соответствии с выражением  $H_{г}|_{f_{2\max}} \leq x_{\min}$ .

3. Благодаря описанному явлению повышения глубины резкости микрофокусная рентгенография позволяет исключить традиционное для стандартной рентгенографии противоречие между разрешающей способностью и дозовой чувствительностью приемника излучения. Как известно, с целью увеличения резкости «контактных» рентгеновских снимков в стандартной рентгенографии необходимо уменьшать размеры элементарной чувствительной площадки приемника изобра-

жения – пикселя в цифровой рентгенографии или зерна фотоэмульсии в пленочной рентгенографии. Однако линейное уменьшение размеров одного пикселя, например в два раза, приводит к снижению чувствительности всего приемника в четыре раза, поэтому в обычной рентгенографии приходится использовать мощные рентгеновские аппараты. В противоположность этому при съемке с увеличением изображения в микрофокусной рентгенографии на увеличенном изображении будут увеличены также и представляющие особый интерес для целей диагностики мелкие детали объекта. Следовательно, для их резкой визуализации нет необходимости уменьшать размер пикселя, наоборот, в зависимости от степени увеличения изображения размеры пикселя могут быть увеличены без ущерба для качества получаемых снимков. При этом увеличение размеров пикселя позволяет в квадратичной зависимости повысить чувствительность приемника излучения и, соответственно, снизить мощность рентгеновского аппарата.

### Результаты и обсуждения

Для реализации микрофокусного способа съемки деталей из ПКМ была разработана и изготовлена рентгеновская установка в составе аппарата РАП-200М моноблочного типа (рис. 7) на основе рентгеновской трубки 0,2 БПМ64-200 [10] и цифрового приемника изображения, построенного по схеме «экран – оптика – ПЗС» [11].



Рис. 7. Внешний вид рентгеновского аппарата РАП-200М

Рентгеновская трубка 0,2 БПМ64-200 была специально разработана для целей микрофокусной рентгенографии и имеет фокусное пятно размером менее 0,1 мм. Основным отличием ее конструкции от

конструкций известных отечественных микрофокусных рентгеновских трубок серии БС [12] является расположенный внутри вакуумного баллона трубки анод с массивной мишенью. Это позволило, во-первых, увеличить почти на порядок мощность, подводимую к мишени при сохранении заданных размеров фокусного пятна. Во-вторых, благодаря этому впервые в нашей стране удалось поднять рабочее напряжение микрофокусных трубок до 200 кВ.

Внутреннее размещение анода привело к увеличению минимального фокусного расстояния до нескольких десятков миллиметров. Для сравнения, в трубках серии БС оно составляет несколько миллиметров. Однако при диагностике деталей из ПКМ, вследствие их сложной формы и больших размеров, такое увеличение фокусного расстояния не является недостатком.

В качестве приемника изображения используется многокамерная система визуализации (рис. 8).

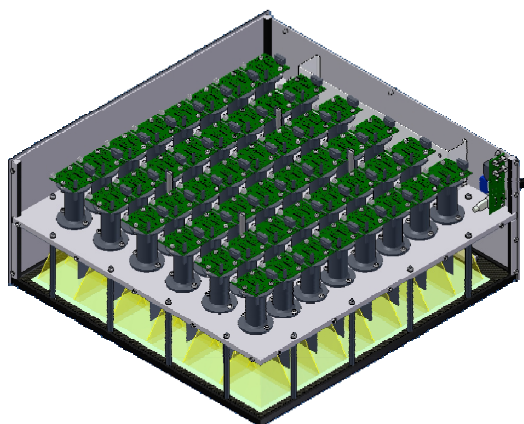


Рис. 8. Многокамерная система визуализации (IONA-M7000)

Принцип действия такого приемника заключается в преобразовании скрытого рентгеновского изображения объекта просвечивания в видимое изображение с помощью гадолиниевого ( $Gd_2O_2S:Tb$ ) рентгенофлуоресцентного экрана, который установлен на входном окне приемника. Оптический узел, состоящий из 48 светосильных объективов, передает видимое изображение на телекамерный блок. В основе телекамерного блока лежит сборка ( $6 \times 8$ ) из 48 отдельных телевизионных камер на основе ПЗС-матриц, каждая из которых «снимает»

изображение со своего поля (участка экрана). Благодаря этому разрешающая способность приемника повышена и составляет 7 пар линий/мм. Цифровой сигнал, полученный на выходе каждой телевизионной камеры, обрабатывается и передается в компьютер. Специальный алгоритм («сшивки») отдельных изображений каждого поля позволяет восстановить изображение всего объекта без потери информации на границе полей.

Установка позволяет получать как высокоинформативные обзорные контактные снимки отдельной детали из ПКМ целиком, так и увеличенные до нескольких десятков раз снимки ее участков, включая многоракурсную съемку. С этой целью рентгеновский аппарат и приемник изображения располагаются на передвижных штативных устройствах, обеспечивающих автоматическое перемещение каждого из них в вертикальной плоскости по двум координатам (рис. 9). Алгоритм перемещения зависит от задачи контроля, а также типа и размеров исследуемой детали.

Управление работой рентгеновской установки, включая реализацию алгоритма взаимного перемещения моноблока рентгеновского аппарата и приемника изображения, выбор режимов их работы, получение снимков и их последующая обработка осуществляются с помощью специализированного программного обеспечения.

Основные характеристики рентгеновской установки приведены в таблице.



Рис. 9. Установка микрофокусной рентгенографии

### Характеристики микрофокусного рентгеновского аппарата РАП-200М

Характеристика	Ед. изм.	Значение
Максимальное напряжение	кВ	200
Максимальный ток	мА	0,5
Минимальный размер фокусного пятна	мм	0,05
Минимальное фокусное расстояние	мм	60
Угол раствора пучка излучения	град	40×60
Габариты моноблока рентгеновского аппарата	мм	360×160×110
Вес моноблока рентгеновского аппарата	кг	8
Разрешающая способность	пар линий/мм	7
Контрастная чувствительность	%	1,7
Размер входного окна приемника рентгеновского изображения	мм	255×185
Габариты приемника рентгеновского изображения	мм	300×240×230
Вес приемника изображения	кг	15

Совместно с коллективом научно-образовательного центра авиационных композитных технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета произведены исследования по выявлению пористости и складок в различных конструктивных элементах авиационных деталей и узлов из ПКМ на разработанной установке.

Одним из объектов исследований являлся образец с внедренными дефектами. Образец выполнен из ПКМ с дополнительными конструктивными элементами в виде фланцевого соединения и ребра жесткости. Внешний вид образца показан на рис. 10.



Рис. 10. Образец из ПКМ с внедренными дефектами

На рис. 11 приведены примеры увеличенных рентгенографических изображений внедренных дефектов в виде пустот и складок в конструктивных элементах образца.

В результате исследований были определены минимальные размеры обнаруженных дефектов, которые не превысили 0,5 мм.

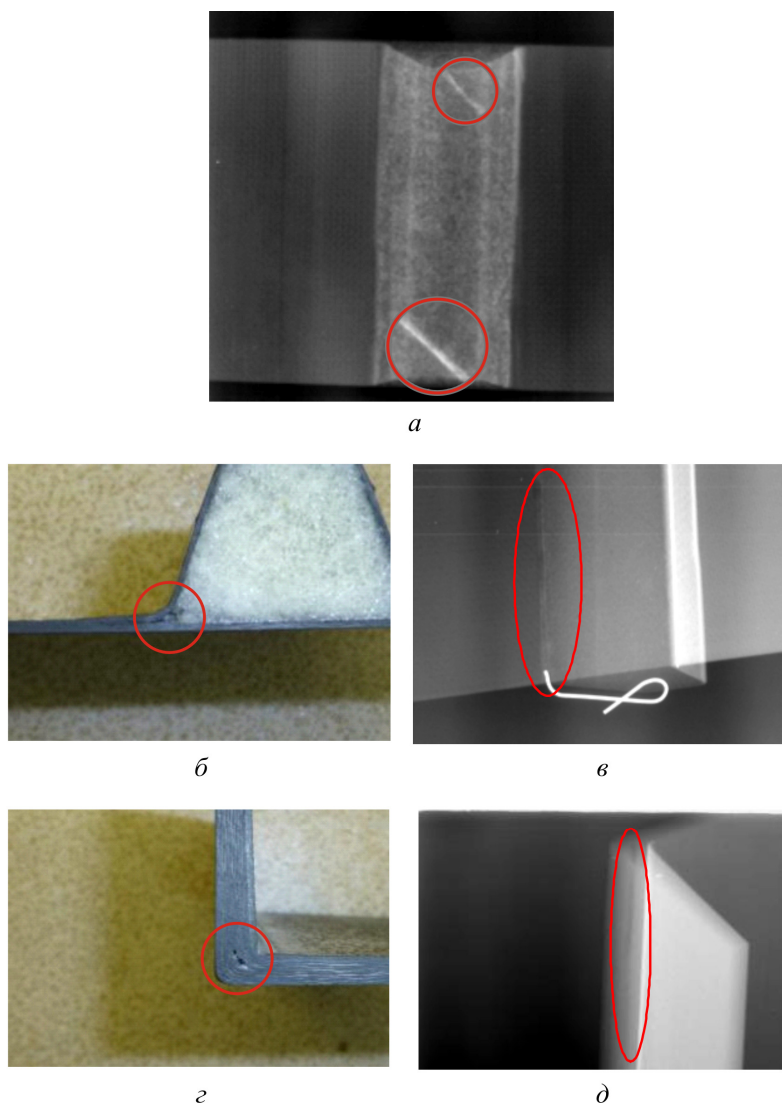


Рис. 11. Примеры рентгеновских изображений конструктивных элементов из ПКМ: *a* – рентгеновское изображение складки в ребре жесткости; *б* – внешний вид ребра жесткости с дефектом в виде поры; *в* – рентгеновское изображение дефекта в виде поры в ребре жесткости; *г* – внешний вид фланцевого соединения с дефектом в виде поры; *д* – рентгеновское изображение дефекта в виде поры в фланцевом соединении

## Выводы

Приведена технология оперативного контроля авиационных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов на основе разработанной установки микрофокусной рентгенографии.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что разработанная технология по контролю и получению рентгенографических изображений деталей и узлов из ПКМ позволяет обнаруживать основные типы дефектов, расположенных как во фланцевой части, так и в элементах ребер жесткости. При этом время получения одного рентгенографического изображения не превышает 15 с, а общее время анализа с учетом визуальной оценки оператором 1–2 мин. Это удовлетворяет необходимым требованиям при организации поточного контроля авиационных деталей из ПКМ в процессе их серийного производства.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта по теме «Создание портативной установки для микрофокусной рентгенографии с целью оперативного контроля микроструктуры, физико-химических свойств и определения остаточного ресурса авиационных деталей и узлов из полимерных композиционных материалов» (проект № 15-19-00259).*

## Библиографический список

1. Вотинков А.М. Технология композиционных материалов / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1998. – 138 с.
2. Repair of damage in aircraft composite sound-absorbing panels / A.N. Anoshkin, V.Y. Zuiko, M.A. Tashkinov, V.V. Silberschmidt // Composite Structures. – 2015. – Vol. 120. – P. 153–166. DOI: 10.1016/j.comstruct.2014.10.001
3. The effect of technological defects on performance of fabric-reinforced composites / A.N. Anoshkin, D.S. Lobanov, V.P. Matveenko, A. Roy, V.V. Silberschmidt, M.A. Tashkinov // Proceedings of 16th European Conference on Composite Materials. – Seville, 2014.
4. Аношкин А.Н., Ташкинов А.А. Прогнозирование несущей способности композитных фланцев корпусных деталей авиадвигателей: монография / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 1998. – 101 с.
5. Рентгенотехника: справочник: в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 1980. – Кн. 2. – 383 с.



6. Румянцев С.В. Радиационная дефектоскопия. – М.: Атомиздат, 1974. – 500 с.
7. Артемьев Б.В., Буклей А.А. Радиационный контроль: учеб. пособие / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Спектр, 2013. – 192 с.
8. Потрахов Н.Н. Метод и особенности формирования теневого рентгеновского изображения микрофокусными источниками излучения // Вестник нов. мед. технологий. – 2007. – Т. XIV, № 3. – С. 167–169.
9. Потрахов Н.Н., Грязнов А.Ю. Микрофокусная рентгенография в медицинской диагностике. – СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 121 с.
10. Потрахов Н.Н., Подымский А.А., Куликов Н.А. Рентгеновские трубки нового поколения // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. тр. III Всерос. конф. – СПб., 2014. – С. 153–157.
11. Рентгеновские диагностические аппараты: в 2 т. / под ред. Н.Н. Блинова, Б.И. Леонова. – М.: Экран, 2001. – Т. 1. – 220 с.
12. Иванов С.А., Щукин Г.А. Рентгеновские трубки технического назначения. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 200 с.

### References

1. Votinov A.M. Tekhnologiya kompozitsionnykh materialov [Technology of composite materials]. Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 1998. 138 p.
2. Anoshkin A.N., Zuiko V.Y., Tashkinov M.A., Silberschmidt V.V. Repair of damage in aircraft composite sound-absorbing panels. *Composite Structures*, 2015, vol. 120, pp. 153-166. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.10.001
3. Anoshkin A.N., Lobanov D.S., Matveenkov V.P., Roy A., Silberschmidt V.V., Tashkinov M.A. The effect of technological defects on performance of fabric-reinforced composites. *Proceedings of 16th European Conference on Composite Materials*. Seville, 2014.
4. Anoshkin A.N., Tashkinov A.A. Prognozirovaniye nesushchey sposobnosti kompozitnykh flantsev korpusnykh detaley aviadvigatelya [Prediction of carrying capacity of composite flanges for the aircraft engine casing parts]. Permskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 1998. 101 p.
5. Klyuev V.V. Rentgenotekhnika: spravochnik [X-ray engineering: handbook]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. Book 2. 383 p.
6. Rumyantsev S.V. Radiatsionnaya defektoskopiya [X-ray flaw detection]. Moscow: Atomizdat, 1974. 500 p.

7. Artemev B.V., Bukley A.A. Radiatsionnyy kontrol [Radioactive control]. Moscow: Spektr, 2013. 192 p.

8. Potrakhov N.N. Metod i osobennosti formirovaniya tenevogo rentgenovskogo izobrazheniya mikrofokusnymi istochnikami izlucheniya [The method and peculiarities of the forming shadow X-ray image by microfocus radiation sources]. *Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologiy*, 2007, vol. XIV, no. 3, pp. 167-169.

9. Potrakhov N.N., Gryaznov A.Yu. Mikrofokusnaya rentgenografiya v meditsinskoy diagnostike [Microfocus X-ray imaging in medical diagnostics]. Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy elektrotekhnicheskii universitet, 2012. 121 p.

10. Potrakhov N.N., Podymskiy A.A., Kulikov N.A. Rentgenovskie trubki novogo pokoleniya [New generation X-ray tubes]. *Sbornik trudov III Vserossiyskoy konferentsii "Elektronika i mikroelektronika SVCh"*. Saint Petersburg, 2-5 June 2014, pp. 153-157.

11. Rentgenovskie diagnosticheskie apparaty [X-ray diagnostic units]. Eds. N.N. Blinov, B.I. Leonov [et al.]. Moscow: Ekran, 2001. 220 p.

12. Ivanov S.A., Shchukin G.A. Rentgenovskie trubki tekhnicheskogo naznacheniya [X-ray tubes for technical purpose]. Leningrad: Energoatomizdat, 1989. 200 p.

### Об авторах

**Потрахов Николай Николаевич** (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: kzhamova@gmail.com).

**Жамова Карина Константиновна** (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: kzhamova@gmail.com).

**Бессонов Виктор Борисович** (Санкт-Петербург, Россия) – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Электронные приборы и устройства» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: vbbessonov@yandex.ru).

**Грязнов Артем Юрьевич** (Санкт-Петербург, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: ay-gryaznov@yandex.ru).

**Ободовский Анатолий Владимирович** (Санкт-Петербург, Россия) – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5, e-mail: obodovsky@yandex.ru).

### About the authors

**Nikolay N. Potrakhov** (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (ETU) (5, Professora Popova st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: kzhamova@gmail.com).

**Karina K. Zhamova** (Saint Petersburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (ETU) (5, Professora Popova st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: kzhamova@gmail.com).

**Viktor B. Bessonov** (Saint Petersburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Assistant, Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (ETU) (5, Professora Popova st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: vbbessonov@yandex.ru).

**Artem Yu. Gryaznov** (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (ETU) (5, Professora Popova st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: ay-gryaznov@yandex.ru).

**Anatoly V. Obodovskiy** (Saint Petersburg, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Electronic Instruments and Devices Saint Petersburg Electrotechnical University “LETI” (ETU) (5, Professora Popova st., St. Petersburg, 197376, Russian Federation, e-mail: obodovsky@yandex.ru).