

УДК 620.183.6

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОЛЬЦЕВЫХ СВАРНЫХ ШВОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА С ПОМОЩЬЮ РЕНТГЕНОВСКОГО АППАРАТА РАП-120ПМ¹

© Е. Н. Потрахов², Н. Н. Потрахов³, А. А. Подымский⁴,
В. Б. Бессонов³, А. Ю. Грязнов³

Статья поступила 22 июня 2016 г.

Приведены результаты контроля кольцевых сварных швов малого диаметра в различных конструктивных элементах авиакосмической техники. Методика контроля основана на использовании современной отечественной рентгеновской трубки с вынесенной из вакуумного объема на длинной анодной трубе массивной торцевой мишенью. Конструкция анодного узла обеспечивает панорамный выход излучения и позволяет получить рентгеновское изображение шва по всей его длине за одну экспозицию. Для достижения необходимой рентгенографической чувствительности и в первую очередь резкости получаемых рентгеновских изображений в конструкции трубки и генераторного устройства рентгеновского аппарата предусмотрены специальные технические решения для регулировки размеров фокусного пятна. Представлена конструкция специализированного рентгеновского аппарата РАП-120ПМ с указанием его основных технических характеристик. Приведены области его применения, а также результаты использования аппарата в условиях реального производства на одном из отечественных моторостроительных предприятий авиакосмической отрасли.

Ключевые слова: рентгеновская диагностика; рентгенографический контроль; панорамная рентгеновская съемка; кольцевой сварной шов; рентгенографическая чувствительность; рентгеновский аппарат; массивная торцевая мишень; фокусное пятно.

В современной авиакосмической технике широко применяют конструктивные элементы, содержащие кольцевые сварные соединения диаметром от десятков до нескольких сотен миллиметров и более. Как известно, для оценки качества сварных швов используют радиационные методы контроля и в первую очередь рентгенографию [1]. Однако обширная номенклатура свариваемых материалов, большой разброс геометрических размеров и сложная форма конструктивных элементов в целом ряде случаев не позволяют применять для их контроля выпускаемые серийно рентгеновские аппараты на основе традиционных рентгеновских трубок. Поэтому используют специально разработанные технические средства рентгеновской диагностики [2, 3].

Рентгенографический контроль кольцевых сварных соединений в конструктивных элементах трубчатой формы проводят в соответствии с рентгенооптическими схемами, представленными на рис. 1 [4]. Очевидно, что наибольшая эффективность достигается в случае панорамной схемы съемки (см. рис. 1, е), позволяющей на одном (при использовании соответствующей рентгеновской пленки) или нескольких снимках за одну экспозицию получить изображение

всего шва. Однако практическая ее реализация требует использования специализированного рентгеновского аппарата, генерирующего пучок излучения с углом раствора 360° в плоскости, перпендикулярной продольной оси прибора (панорамный пучок).

При контроле сварных швов в трубах большого диаметра (около 1000 мм) нефтегазопроводов подобные специализированные рентгеновские аппараты применяются. При этом излучатель на самодвижущейся тележке («кроулере») перемещается внутри трубы [5]. Однако вследствие ограниченных размеров излучателя минимальный диаметр контролируемого шва составляет (например, для отечественного рентгеновского кроулера АРГО-3 [6]) 530 мм.

Для контроля швов малого диаметра целесообразно использовать аппараты на основе рентгеновских трубок с вынесенной из вакуумного баллона мишенью [7, 8]. Это позволит в том числе обеспечить необходимую рентгенографическую чувствительность, особенно в случае сварных соединений легкоатомных материалов (титана, алюминия, полимерных композитов и др.).

Размер фокусного пятна рентгеновской трубки при панорамной съемке также должен отвечать определенным требованиям — геометрическая нерезкость изображения дефектов не должна превышать половины требуемого значения разрешающей способности рентгеновского снимка [9].

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00155).

² ЗАО «ЭЛТЕХ-Мед», С.-Петербург, Россия.

³ Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), С.-Петербург, Россия.

⁴ ЗАО «Светлана-Рентген», С.-Петербург, Россия.

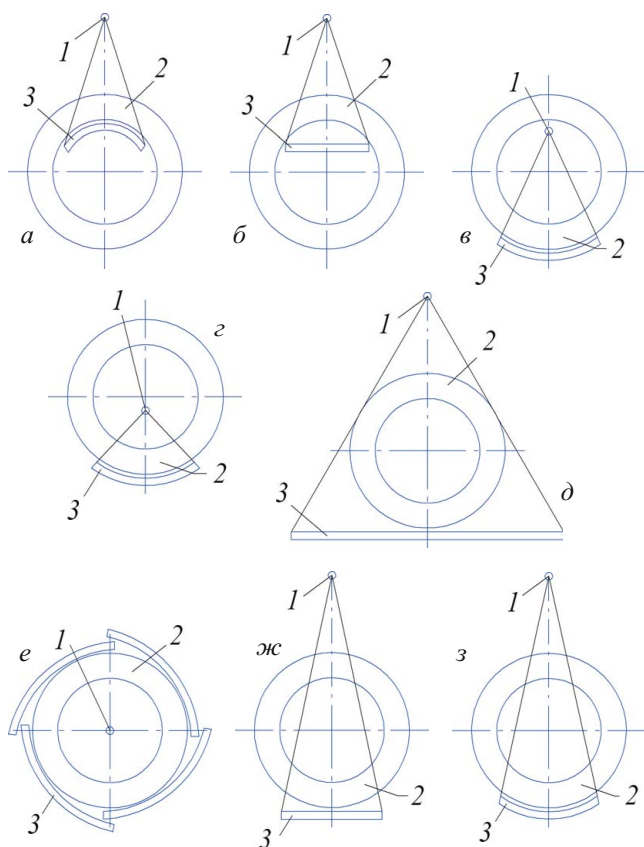


Рис. 1. Рентгенооптические схемы контроля кольцевых сварных соединений: а – г — съемка «через одну стенку»; д, ж, з — съемка «через две стенки»; е — панорамная съемка (1 — источник рентгеновского излучения; 2 — объект контроля; 3 — касета с рентгеновской пленкой)

На рис. 2 представлен эскиз фрагмента алюминиевой корпусной детали, содержащей кольцевые сварные швы разного диаметра. Для их контроля использовали специализированный рентгеновский аппарат моноблочного типа РАП-120ПМ с модернизированной металлостеклянной трехэлектродной рентгеновской трубкой серии БПВ (максимальное рабочее напряжение трубки — 120 кВ, максимальный ток — 1,2 мА, минимальный диаметр фокусного пятна — 0,1 мм). Электронный пучок фокусируется постоянным кольцевым магнитом.

В отличие от традиционно применяемых в панорамных трубках конусных мишеней, расположенных внутри вакуумного баллона, в РАП-120ПМ использована вынесенная на алюминиевой анодной трубе плоская (торцевая) вольфрамовая мишень (рис. 3, а) [10]. Такая мишень обеспечивает необходимую равномерность интенсивности генерируемого пучка излучения в угле раствором $360 \times 40^\circ$ и, соответственно, по всей длине контролируемого шва.

Анод трубки соединен с корпусом моноблока и заземлен. Ускоряющее напряжение отрицательной полярности подается на ее катодно-сеточный узел от специального генераторного устройства (см. рис. 3, б), в состав которого, помимо высоковольтного источника ускоряющего напряжения, входят источники

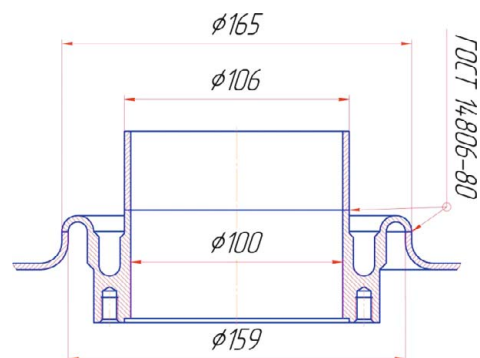


Рис. 2. Эскиз фрагмента корпусной детали

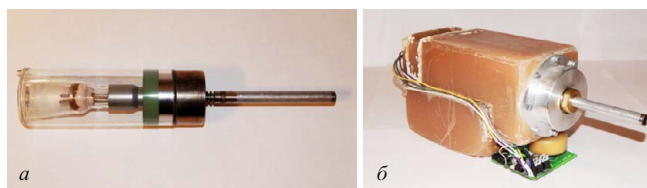


Рис. 3. Рентгеновская трубка 0,144БПВ33-120 с панорамным выходом излучения (а) и генераторное устройство рентгеновского аппарата РАП-120М без наружного корпуса (б)

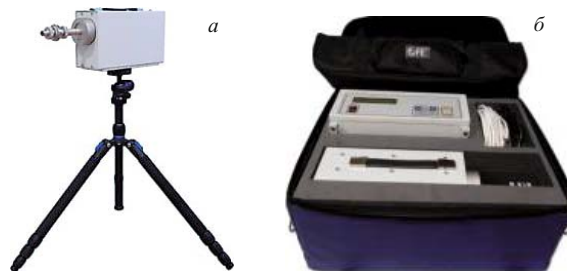


Рис. 4. Моноблок рентгеновского аппарата РАП-120ПМ на штативе (а) и полный комплект аппарата в транспортной сумке (б)

питания накала катода и управляющего (сеточного) напряжения.

В конструкции моноблока (рис. 4) применены современные схмотехнические решения: непосредственное выпрямление сетевого напряжения, преобразование выпрямленного напряжения на частоте несколько десятков килогерц, частотно-импульсный режим работы преобразователя (модуляции выпрямленного напряжения), многокаскадное умножение модулированного напряжения. Элементы высоковольтного источника напряжения залиты в эпоксидный компаунд, зазор между стенками баллона трубки и высоковольтного гнезда в моноблоке заполнен трансформаторным маслом [11]. Габариты: моноблока — $400 \times 100 \times 160$ мм (масса — 5 кг); пульта управления — $300 \times 200 \times 130$ мм (масса — 4 кг). Длина кабеля связи между пультом управления и моноблоком (12 м) позволяет удалить персонал на безопасное расстояние, определенное по результатам дозиметриче-

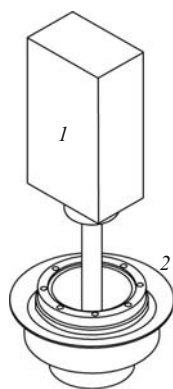


Рис. 5. Схема расположения моноблока рентгеновского аппарата РАП-120ПМ (1) и просвечиваемой корпусной детали (2) при контроле сварных швов

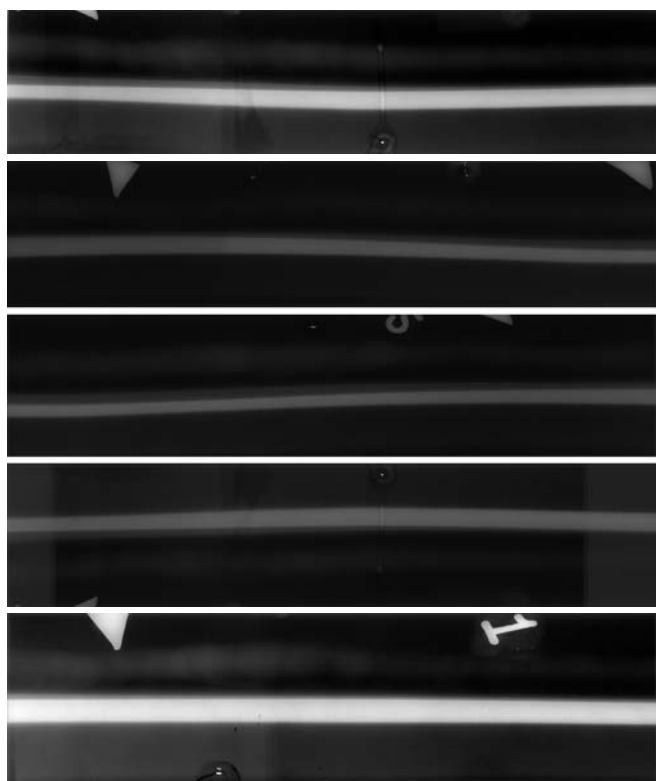


Рис. 6. Рентгеновский снимок по длине кольцевого шва алюминиевой корпусной детали (масштаб 3:1)

ских измерений. В общем случае безопасные условия работы персонала при эксплуатации аппарата обеспечиваются расположением анода трубки внутри контролируемой детали и, соответственно, поглощением потока излучения ее стенками, а также рекордно малым током трубки во время просвечивания.

На рис. 5 представлена схема съемки кольцевого сварного шва малого диаметра корпусной детали (анод рентгеновской трубки в составе моноблока 1 располагается внутри конструкционного элемента 2 на уровне сварного шва). На рис. 6 — рентгеновский снимок (негатив) по всей длине наружного кольцевого шва (наружный диаметр шва — 165 мм, см. рис. 2). Толщина алюминиевых стенок в области сварного шва (радиационная толщина) составляла более 9 мм.

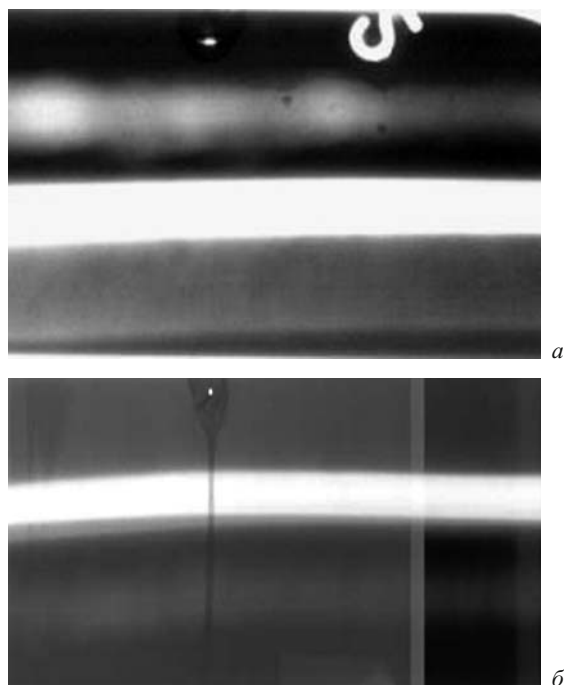


Рис. 7. Фрагменты рентгеновских снимков кольцевого сварного шва с дефектами сварки (а) и канавочного эталона (б)

Для съемки использовали рулонную рентгеновскую пленку D7, которая кольцом (диаметр около 170 мм) располагалась вокруг шва. Режим съемки: напряжение — 70 кВ, ток — 1 мА, время экспозиции — 90 с.

На рис. 7, а показан фрагмент рентгеновского снимка шва с обнаруженными дефектами сварки в виде пор.

Рентгенографическую чувствительность съемки оценивали с помощью канавочного эталона № 1 [4]. При стандартной методике анализа рентгеновских снимков с использованием негатоскопа на полученном изображении сварного шва (см. рис. 7, б) ясно видна канавка эталона глубиной 0,1 мм.

Таким образом, в отличие от традиционного АРГО-3 аппарат РАП-120ПМ позволяет контролировать швы малого (от 50 мм) диаметра с необходимой рентгенографической чувствительностью. Технические и технологические решения, примененные в процессе его разработки и апробации, обеспечивают выполнение необходимых требований по напряжению, току, размеру фокусного пятна, а также габаритам и весу к источнику рентгеновского излучения, предназначенному для контроля кольцевых сварных швов по панорамной схеме съемки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев Б. В., Буклей А. А. Радиационный контроль: учебное пособие / Под. ред. В. В. Ключева — 2-е изд. — М.: Спектр, 2013. — 192 с.
2. Иванов С. А., Потрахов Н. Н., Шукин Г. А. Специализированная рентгеновская установка для микродефектоскопии / Электронная техника. 1989. № 2. С. 100 — 101.
3. Потрахов Н. Н., Шестопалов М. Ю. Диагностика концевых деталей малого диаметра / Контроль. Диагностика. 2012. № 9. С. 28 — 31.

4. ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Сварные соединения. — М.: Госстандарт СССР, 1981. — 80 с.
5. Ключев В. В., Кузин М. А., Мужикский В. Ф. Применение кроулеров в России / Сборник материалов 10-й международной деловой встречи «Диагностика-2000». 2000. Т. 2. С. 104.
6. <http://www.ncontrol.ru/catalog/Rentgenovskij-kontrol/Rentgenovskie-kroulery/Rentgenovskij-krouler-Argo-3>. Аппарат Арго-3 (дата обращения 10.03.2017).
7. А. с. 1712984 СССР, H01J35/08. Выносной анод рентгеновской трубки / В. М. Мухин, Н. Н. Потрахов, Л. А. Пузын — № 4755623; заявл. 3.11.89; опубл. 15.02.92. Бюл. № 6.
8. Пат. 10288 РФ, H01J35/00. Рентгеновская трубка (варианты) / Ключников И. В., Мухин В. Н., Потрахов Н. Н.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» — № 98121825; заявл. 26.11.98; опубл. 16.06.99. Бюл. № 6.
9. Алхимов Ю. В., Ефимов П. В., Сертаков Ю. И. Цифровые радиационные системы неразрушающего контроля: учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2012. — 151 с.
10. Куликов Н. А., Сербин В. А., Валуйев Н. Н., Кузьмин Э. В. Рентгеновские трубки / Обзоры по электронной технике. Электрорадиационные и газоразрядные приборы. 2003. Вып. 1. С. 10 – 12.
11. Пат. 2278440 РФ, МПК H01J35/02, H05G1/02, A61B6/03. Моноблок источника рентгеновского излучения / Потрахов Н. Н., Мухин В. М.; заявитель и патентообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» — № 2005111813; заявл. 20.04.05; опубл. 20.06.06. Бюл. № 17.
2. Ivanov S. A., Potrakhov N. N., Shchukin G. A. Specialized x-ray machine for microinspection / *Élektron. Tekhn.* 1989. N 2. P. 100 – 101 [in Russian].
3. Potrakhov N. N., Shestopalov M. Yu. Diagnosis end of small diameter components / *Kontrol'. Diagn.* 2012. N 9. P. 28 – 31 [in Russian].
4. GOST 7512–82. Non-destructive testing. Welded joints. — Moscow: Izd. Gosstandart SSSR, 1981. — 80 p. [in Russian].
5. Klyuev V. V., Kuzin M. A., Muzhetskii V. F. Application of crawlers in Russia / Collection of materials of the 10th international business meeting “Diagnostics-2000”. 2000. Vol. 2. P. 104 [in Russian].
6. <http://www.ncontrol.ru/catalog/Rentgenovskij-kontrol/Rentgenovskie-kroulery/Rentgenovskij-krouler-Argo-3>. Apparatus Argo-3 (accessed 10.03.2017) [in Russian].
7. USSR Inventor's Certificate 1712984, H01J35/08. External anode x-ray tube / V. M. Mukhin, N. N. Potrakhov, L. A. Puzyan — N 4755623; appl. 3.11.89; publ. 15.02.92. Byull. Otkryt. Izobret. N 6.
8. RF Pat. 10288, H01J35/00. The x-ray tube (versions) / Klyuchnikov I. V., Mukhin V. N., Potrakhov N. N.; owner SPbGÉTU «LÉTI» — N 98121825; appl. 26.11.98; publ. 16.06.99. Byull. Otkryt. Izobret. N 6.
9. Alkhimov Yu. V., Efimov P. V., Sertakov Yu. I. Digital radiological system of nondestructive testing: a training manual. — Tomsk: Izd. TPU, 2012. — 151 p. [in Russian].
10. Kulikov N. A., Serbin V. A., Valuev N. N., Kuz'min É. V. X-ray tube / *Obz. Élektron. Tekhn. Élektrovak. Gazorazr. Prib.* 2003. Issue 1. P. 10 – 12.
11. RF Pat. 2278440, MPK H01J35/02, H05G1/02, A61B6/03. Monoblock x-ray source / Potrakhov N. N., Mukhin V. M.; owner SPbGÉTU «LÉTI» — N 2005111813; appl. 20.04.05; publ. 20.06.06. Byull. Otkryt. Izobret. N 17.

REFERENCES

1. Artem'ev B. V., Buklei A. A. Radiation control: training manual. 2nd Edition. — Moscow: Spektr, 2013. — 192 p. [in Russian].