

*Е.И. Косарина<sup>1</sup>, Н.А. Михайлова<sup>1</sup>, А.А. Демидов<sup>1</sup>, Е.М. Турбин<sup>1</sup>*

## **РЕНТГЕНОВСКИЙ КОНТРОЛЬ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОТЛИВОК СЛОЖНОЙ ФОРМЫ ИЗ СПЛАВОВ ГРУППЫ «СИЛУМИН»**

*Рассмотрены вопросы рентгеновского контроля крупногабаритных отливок сложной формы из алюминиевых сплавов в условиях производства. Определена технологическая последовательность проведения контроля по разработанным технологическим картам.*

**Ключевые слова:** *рентгеновский неразрушающий контроль, технологическая карта, чувствительность, оптимальные режимы и параметры контроля.*

*Е.И. Kosarina<sup>1</sup>, N.A. Mikhaylova<sup>1</sup>, A.A. Demidov<sup>1</sup>, E.M. Turbin<sup>1</sup>*

## **X-RAY TESTING OF LARGE-SIZED INTRICATE CASTINGS MADE FROM ALUMINUM ALLOYS**

*Some aspects of X-ray testing of large-sized intricate castings made from aluminum alloys under industrial conditions are discussed. The operational sequence of testing procedure according to the designed flow sheets is defined.*

**Keywords:** *X-ray testing, flow sheets, sensitivity, optimum modes and parameters of testing.*

---

<sup>1</sup> Федеральное 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

При производстве авиационной техники в большом объеме используются полуфабрикаты, изготовленные методом литья, из алюминиевых сплавов. Наиболее распространенными являются сплавы системы алюминий–кремний, называемые силуминами. К этой группе относятся сплавы АК12 (АЛ2), АК9ч. (АЛ4), АК5М (АЛ5), АК7ч. (АЛ9), АК7п.ч. (АЛ9-1), АК8М (АЛ32), АК8л (АЛ34), ВАЛ8, из которых изготавливают корпуса агрегатов, крышки, заглушки и пр.

Все отливки проходят стопроцентный рентгеновский контроль. Основным документом, по которому проводят рентгенографический контроль, является технологическая карта контроля (ТКК), в которой указаны применяемые аппаратура и средства контроля, режимы и параметры контроля. Если объект контроля (ОК) сложной формы, то экспонирование проводят несколько раз, меняя схему контроля. Расчет режимов и параметров контроля необходимо осуществлять в соответствии с действующими стандартами или нормами: для изделий авиационной техники основным документом является производственная инструкция ПИ 1.2.226–2008.

В соответствии с требованиями, регламентированными в инструкции, определим технологическую последовательность при составлении карты контроля. Поскольку бездефектную отливку получить невозможно, то все дефекты, содержащиеся в ней, классифицируют как допустимые и недопустимые. Эта градация определяется условиями эксплуатации изделия: механическими, динамическими и температурными нагрузками. Таким образом, конструктор, технолог и металлург определяют размеры предельно допустимых дефектов и их количество. Исходя из этой информации следует проводить рентгеновский контроль таким образом, чтобы гарантировано обнаружить недопустимые дефекты. Согласно требованиям ПИ 1.2.226–2008 и других нормативных

документов, в том числе европейских норм (EN), обнаружение предельно допустимого дефекта гарантировано, если минимальный дефект, видимый на рентгеновском снимке, по своим размерам в 2 раза меньше. Размер минимального дефекта, видимого на снимке, принято считать чувствительностью контроля [1, 2]. Чувствительность контроля – исходная информация, располагая которой разрабатывают ТКК. Для отливок ответственного назначения требуемая чувствительность контроля  $k$  в зависимости от толщины представлена в таблице [3].

**Чувствительность контроля**

Толщина ОК, мм	До 5	5–9	9–12	12–20	20–30	30–40	40–50	50–70
Чувствительность $k$ , мм	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6

Для рентгеновского контроля неизменным условием контролепригодности является возможность двухстороннего доступа к ОК: с одной стороны располагают источник излучения, с противоположной стороны – кассету с радиографической пленкой. Разработку ТКК начинают с определения схемы контроля (относительного расположения источника излучения, ОК и радиографической пленки). Перед проведением контроля следует провести разметку отливки на участки контроля. Разметку проводят исходя из толщины контролируемого участка: за одну экспозицию возможно просвечивание участка, в пределах которого просвечиваемая толщина  $d_{пр}$  меняется в пределах – от  $d_{пр}$  до  $d_{пр} + (0,1 \div 0,2) \cdot d_{пр}$ . Для каждого участка контроля выбирают эталон чувствительности, содержащий элемент, размеры которого в направлении распространения излучения равны чувствительности контроля. Эталон чувствительности следует располагать на стороне ОК, обращенной к источнику излучения. На рис. 1 показана зависимость анодного напряжения от толщины ОК из сплавов на основе алюминия. Эта зависимость соответствует требованиям ГОСТ 20426–82 [4]. Рентгеновский аппарат, на котором следует проводить экспонирование участка ОК, должен обеспечивать требуемое напряжение.

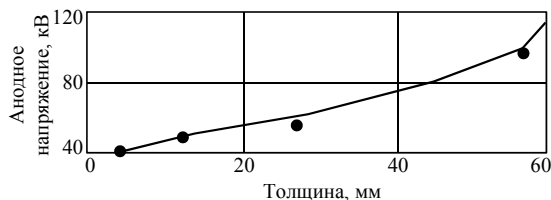


Рис. 1. Зависимость анодного напряжения от толщины участка алюминиевой отливки

Фокусное расстояние  $F$  (расстояние «источник–пленка») не должно превышать минимального значения, при котором геометрическая нерезкость  $u_f$  не превышает значения половины чувствительности контроля:

$$F_{\min} = \frac{2\Phi}{k} a + a,$$

где  $\Phi$  – размер фокусного пятна рентгеновской трубки;  $a$  – расстояние «ОК–пленка»;  $k$  – чувствительность контроля.

Продолжительность экспозиции  $t$  должна быть такой, чтобы оптическая плотность рентгенограммы была не менее 1,5 Б [2]. Желательно, чтобы продолжительность экспозиции составляла  $0,5 \leq t \leq 10$  мин. Нижний предел продолжительности экспонирования обусловлен постепенным выходом в оптимальный режим рентгеновского аппарата. Верхний предел обусловлен тем, что при экспонировании  $>10$  мин происходит накопление рассеянного излучения, отчего снижаются контраст и четкость снимка. Про-

должительность экспозиции можно подобрать экспериментально с учетом сказанного выше, либо пользуясь номограммами экспозиций. Номограммы экспозиций представляют собой семейство кривых – зависимости экспозиции от толщины просвечиваемого материала при разных значениях анодного напряжения. Под экспозицией  $\Xi$  (мА·мин) понимают произведение анодного тока трубки  $I$  (мА) на продолжительность экспонирования  $t$  (мин). На рис. 2 показаны номограммы экспозиций для рентгеновского аппарата РАП90И-5.

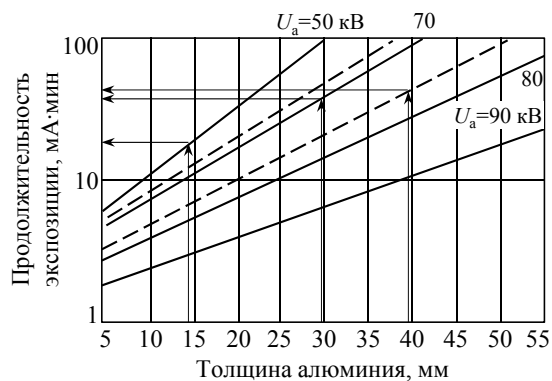


Рис. 2. Номограммы экспозиций для рентгеновского аппарата РАП90И-5 с характеристиками: анодный ток 5 мА; радиографическая пленка D5; фокусное расстояние 700 мм; оптическая плотность снимков  $S=2,0$  Б

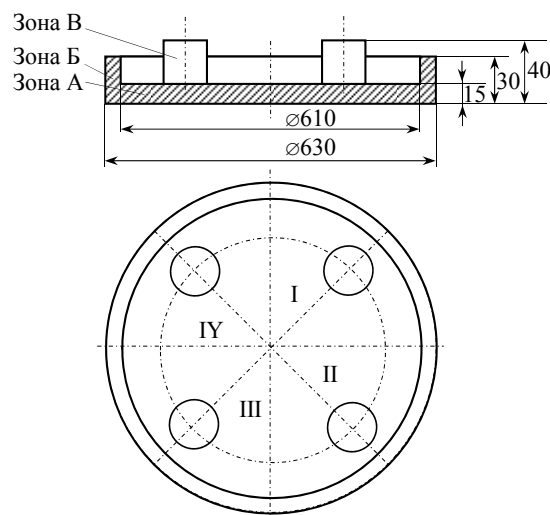


Рис. 3. Эскиз крупногабаритной отливки сложной формы

Для рентгенографического контроля отливок из алюминиевых сплавов следует использовать радиографические пленки классов C1÷C4 (EN 584-1) [5]. К радиографическим пленкам этих классов относятся следующие: фирмы Agfa D2 (класс C1); D3 (класс C2); D4 (класс C3); D5 (класс C4); фирмы Kodak DR (класс C1); MX (класс C2); M (класс C3); T (класс C4) [6].

На рис. 3 представлен эскиз крупногабаритной отливки сложной формы, которая проходит 100%-ный рентгеновский контроль. На примере отливки проведем разработку карты контроля. Перед проведением контроля следует убрать литники, отливку очистить от корки и разметить на участки. Для рассматриваемой отливки количество зон контроля 3, количество участков контроля 4, количество экспозиций на каждом участке 3. Общее количество экспозиций 12.

Для зоны А толщина просвечиваемого материала 15 мм, для зоны Б: 30 мм, для зоны В: 40 мм. Определим чувствительность контроля в соответствии с данными таблицы: выбираем эталон чувствительности или индикатор качества изображения. Проволочные индикаторы качества изображения (ИКИ) с условными обозначениями 6AL EN и 10AL EN [7] (рис. 4, а) содержат элементы с диаметрами:

- 6AL EN:  $W_6=1$  мм,  $W_7=0,8$  мм,  $W_8=0,63$  мм,  $W_9=0,5$  мм,  $W_{10}=0,40$  мм,  $W_{11}=0,32$  мм;
- 10AL EN:  $W_{10}=0,4$  мм,  $W_{11}=0,32$  мм,  $W_{12}=0,25$  мм,  $W_{13}=0,2$  мм,  $W_{14}=0,16$  мм,  $W_{15}=0,12$  мм,  $W_{16}=0,1$  мм.

Канавочный эталон чувствительности из алюминиевого сплава №1 (рис. 4, б) содержит канавки глубиной  $h_1=0,6$  мм,  $h_2=0,5$  мм,  $h_3=0,4$  мм,  $h_4=0,3$  мм,  $h_5=0,2$  мм,  $h_6=0,1$  мм. Эталон чувствительности или ИКИ следует располагать на стороне объекта контроля, обращенной к источнику излучения, т. е. помещать в наихудшие условия обнаружения элементов, выявление которых определяет достижимую чувствительность.

Предпочтительнее применение проволочного ИКИ, поскольку его элементами являются проволочки, выявляемость которых хуже канавок.

Анодное напряжение следует выбирать в зависимости от радиационной толщины контролируемого участка ОК (см. рис. 1).

*Примечание.* Радиационной толщиной называется суммарная толщина просвечиваемого участка в направлении оси пучка излучения [2].

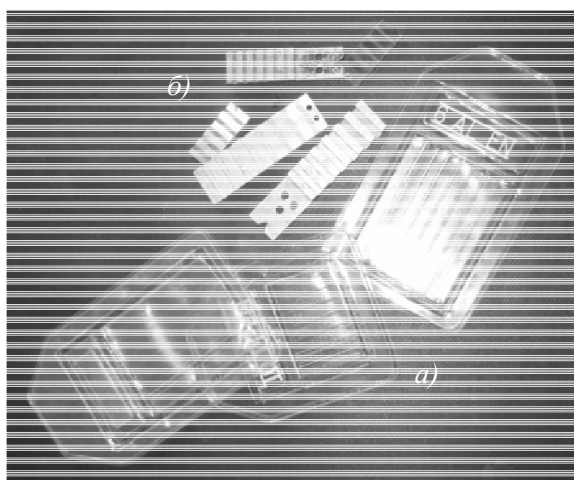


Рис. 4. Проволочные индикаторы качества изображения (а) и канавочные эталоны чувствительности (б) для рентгеновского контроля отливок из алюминиевых сплавов

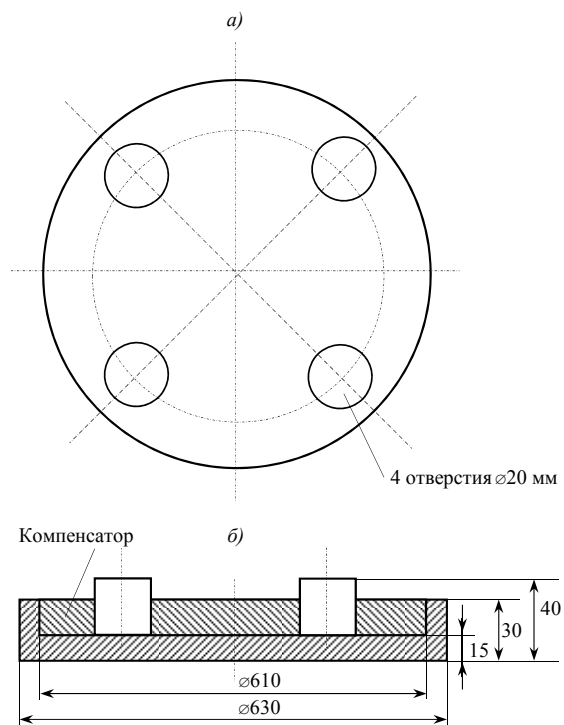


Рис. 5. Эскиз компенсатора (а) и применение компенсатора при экспонировании отливки (б)

Для отливки (рис. 3 и 5) при стопроцентном рентгеновском контроле необходимо использовать три режима экспонирования. Режим экспонирования для толщины 15 мм (зона А): анодное напряжение 50 кВ (см. рис. 1), экспозиция 18 мА·мин (см. рис. 2) при фокусном расстоянии 700 мм. Для подтверждения правильности выбранного режима следует использовать ИКИ 10AL EN, на рентгеновском снимке должна быть видна проволока  $W_{11}=0,32$  мм или эталон чувствительности с канавками №1 – в этом случае видимой должна быть канавка  $h_4=0,3$  мм. Режим экспонирования для толщины 30 мм (зона Б): анодное напряжение 65 кВ, экспозиция 35 мА·мин при фокусном расстоянии 700 мм; ИКИ – 6AL EN; видимой должна быть проволока  $W_{10}=0,4$  мм или канавка  $h_3=0,4$  мм канавочного эталона №1. Режим экспонирования для толщины 40 мм (зона В): анодное напряжение 75 кВ, экспозиция 45 мА·мин при фокусном расстоянии 700 мм; ИКИ – 6AL EN; видимой должна быть проволока  $W_{11}=0,5$  мм или канавка  $h_2=0,5$  мм канавочного эталона №1.

За одну экспозицию контролируют  $\frac{1}{4}$  часть контролируемой отливки (I–IV) (см. рис. 3), ориентируя ее таким образом, чтобы проекция оси пучка излучения попадала на середину контролируемого участка.

Для сокращения экспозиции можно уменьшить фокусное расстояние. Уменьшение фокусного расстояния влечет за собой увеличение геометрической нерезкости, с одной стороны, и уменьшение площади контролируемого участка, с другой стороны. По условиям предельно допустимой геометрической нерезкости фокусное расстояние должно быть не менее  $F_{\min} = \frac{2\Phi}{k} \cdot a + a = \frac{21,2}{0,5} \cdot 40 + 40 = 232$  мм. Площадь контролируемого

участка, которую можно считать равномерно облученной, равна площади круга диаметром, равным  $\frac{2}{3} \cdot F$ . Если контролируемый участок составляет  $\frac{1}{4}$  часть отливки, то наиболее удаленная точка объекта контроля от центра составляет  $\frac{1}{4}$  диаметра, т. е. 155 мм. Таким образом, фокусное расстояние должно быть не менее 232 мм. Если снизить фокусное расстояние до 350 мм, то для сохранения оптической плотности рентгенограммы следует сохранить величину экспозиционной дозы в пределах, определенных номограммами экспозиций, которая (в пределах одного и того же рентгеновского аппарата) составляет:

$$D = \frac{U^2 \cdot I \cdot t}{F^2},$$

где  $U$  – анодное напряжение;  $I$  – анодный ток рентгеновской трубки;  $t$  – продолжительность экспозиции;  $F$  – фокусное расстояние.

Поскольку экспозиционная доза должна оставаться неизменной, а анодное напряжение регламентировано графиком на рис. 1, анодный ток трубки равен рабочему значению, близкому к максимальному, то возможно лишь изменение продолжительности экспозиции в пределах:

$$\frac{t_{\text{н.э}}}{F_{\text{н.э}}^2} = \frac{t_{\text{факт}}}{F_{\text{факт}}^2},$$

$$\text{тогда } t_{\text{факт}} = \frac{t_{\text{н.э}}}{F_{\text{н.э}}^2} \cdot F_{\text{факт}}^2 = t_{\text{н.э}} \cdot \frac{350^2}{700^2} = 0,25 \cdot t_{\text{н.э}},$$

где  $F_{\text{н.э}}$ ,  $t_{\text{н.э}}$ ,  $F_{\text{факт}}$ ,  $t_{\text{факт}}$  – фокусное расстояние и продолжительность экспозиции, определенные по номограммам экспозиции, и фактическое расстояние и продолжительность соответственно.

Для повышения производительности контроля возможно использование компенсаторов, специальных средств, выравнивающих толщину отливки. В частности, для отливки, изображенной на эскизе (см. рис. 3), приведен эскиз компенсатора (см. рис. 5). Компенсатор должен быть выполнен из того же материала, что и отливка; в нем не должно быть дефектов. Применение компенсатора, изображенного на рис. 5, позволяет исключить четыре экспозиции и исключает необходимость экранирования зоны А при просвечивании зон Б и В. Для повышения производительности контроля в перспективе возможна замена рентгенографического метода на рентгеноскопический. Для адаптации радиографических установок при контроле крупногабаритных отливок необходимы специально разработанные манипуляторы и сканирующие системы [8].

Таким образом, разработан основной алгоритм выбора оптимального режима рентгеновского контроля отливок сложной формы из алюминиевых сплавов в соответствии с российскими стандартами и европейскими нормами. Определены значения абсолютной чувствительности контроля в зависимости от толщины отливки.

Показаны способы повышения производительности контроля при сохранении требуемого качества рентгенографических изображений: внесение поправок при изменении параметров контроля и использовании компенсаторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ключев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение. 1998. 170 с.
2. Добромыслов В.А. Радиационные методы неразрушающего контроля. М.: Машиностроение. 1999. 104 с.
3. Косарина Е.И., Степанов А.В., Саввина Н.А. и др. Практическое руководство по радиографическому методу неразрушающего контроля. М.: Контроль и диагностика. 2006. 106 с.
4. ГОСТ 20426–82 Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения.
5. Неразрушающий контроль. Пленка для промышленной радиографии. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной дефектоскопии /Аутентичный перевод EN 584-1: 1994. Стандарт Российского науч.-технич. сварочного общества. М. 4 с.
6. Степанов А.В., Косарина Е.И., Саввина Н.А. Радиографические технические пленки РТ-К и РТ-7Т. Результаты их испытания //Авиационные материалы и технологии. 2012. № 1. С. 37–42.
7. Неразрушающий контроль. Качество изображений при радиографии. Часть 1: Индикаторы качества изображения (проволочного типа, определение величины качества изображения /Аутентичный перевод EN462-1: 2001. Стандарт Российского науч.-технич. сварочного общества. М. 6 с.
8. 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. №S. С. 423–430.

## REFERENS LIST

1. Kljuev V.V., Sosnin F.R. Teorija i praktika radiacionnogo kontrolja [Theory and practice of radiation control: Studies. grant for students of higher education institutions]: Ucheb. posobie dlja studentov vuzov. M.: Mashinostroenie. 1998. 170 s.
2. Dobromyslov V.A. Radiacionnye metody nerazrushajushhego kontrolja [Radiation methods of nondestructive control]. M.: Mashinostroenie. 1999. 104 s.
3. Kosarina E.I., Stepanov A.V., Savvina N.A. i dr. Prakticheskoe rukovodstvo po radiograficheskomu metodu nerazrushajushhego kontrolja [Practical guidance on a radiographic method of nondestructive control]. M.: Kontrol' i diagnostika. 2006. 106 s.
4. GOST 20426–82 Kontrol' nerazrushajushhij. Metody defektoskopii radiacionnye. Oblast' primeneniya [Control nondestructive. Defectoscopy methods the radiation. Scope].
5. Nerazrushajushhij kontrol'. Plenka dlja promyshlennoj radiografii. Chast' 1. Klassifikacija plenochnyh sistem dlja promyshlennoj defektoskopii [Nondestructive control. Film for an industrial radiographic analysis. Part 1. Classification of film systems for industrial defectoscopy] /Autentichnyj perevod EN 584-1: 1994. Standart Rossijskogo nauch.-tehnich. svarochного obshhestva. M. 4 s.
6. Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A. Radiograficheskie tehicheskie plenki RT-K i RT-7T. Rezul'taty ih ispytaniya [Radio graphic technical films of RT-K and RT-7T. Results of their test] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. № 1. S. 37–42.
7. Nerazrushajushhij kontrol'. Kachestvo izobrazhenij pri radiografii. Chast' 1: Indikatory kachestva izobrazhenija (provolochnogo tipa, opredelenie velichiny kachestva izobrazhenija [Nondestructive control. Quality of images at a radiographic analysis. Part 1: Indicators of quality of the image (wire type, determination of size of quality of the image] /Autentichnyj perevod EN462-1: 2001. Standart Rossijskogo nauch.-tehnich. svarochного obshhestva. M. 6 s.
8. Stepanov A.V., Kosarina E.I., Savvina N.A., Usachev V.E. Makro- i mikroporistost' v splavah na osnove aljuminija i nikelja, obnaruzhenie ee rentgenoskopicheskimi metodami nerazrushajushhego kontrolja [Makro- and microporosity in alloys on the basis of aluminum and nickel, detection by its roentgenoscopic methods of nondestructive control] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 423–430.