

Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-85-95

## РЕЖИМЫ РЕНТГЕНОВСКОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗДЕЛИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Е.И. Косарина<sup>1</sup>, А.П. Гримова<sup>1</sup>, Н.В. Осияненко<sup>1</sup>, А.В. Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассчитаны значения линейных коэффициентов ослабления излучения металлическими порошками для аддитивных технологий и их литейными аналогами в зависимости от анодного напряжения на рентгеновской трубке. Рассмотрены сплавы на основе железа, никеля, титана, алюминия и чистые металлы, расчет коэффициентов выполнен для трех значений анодного напряжения. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что регламент ГОСТ 20426–82 может быть распространен на детали, полученные по аддитивным технологиям.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, металлические порошки, литейные сплавы, энергия излучения, линейный коэффициент ослабления излучения, контраст радиационного изображения, чувствительность контроля

**Для цитирования:** Косарина Е.И., Гримова А.П., Осияненко Н.В., Смирнов А.В. Режимы рентгеновского экспонирования при контроле изделий, выполненных по аддитивным технологиям // Труды ВИАМ. 2024. № 12 (142). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-85-95.

Scientific article

## MODES OF X-RAY EXPOSURE FOR PARTS, MADE USING ADDITIVE TECHNOLOGIES

E.I. Kosarina<sup>1</sup>, A.P. Grimova<sup>1</sup>, N.V. Osiyanenko<sup>1</sup>, A.V. Smirnov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The values of linear radiation attenuation coefficients for metal powders for additive technologies and their foundry analogues depending on the anode voltage on the X-ray tube are calculated. Alloys based on iron, nickel, titanium, aluminum and pure metals were considered, and the coefficients were calculated for three values of anode voltage. It has been theoretically established and experimentally confirmed that the GOST 20426–82 regulations can be used for parts produced by additive technologies.

**Keywords:** additive technologies, metal powders, casting alloys, radiation energy, linear radiation attenuation coefficient, radiation image contrast, control sensitivity

**For citation:** Kosarina E.I., Grimova A.P., Osiyanenko N.V., Smirnov A.V. Modes of X-ray exposure for parts, made using additive technologies. *Trudy VIAM*, 2024, no. 12 (142), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-12-85-95.

### Введение

В настоящее время аддитивное производство является одним из перспективных направлений развития новых технологий [1]. Принцип аддитивных технологий заключается в послойном получении изделия на специализированном оборудовании в соответствии с предварительно преобразованной 3D-моделью [2]. Благодаря такой особенности получения детали аддитивное производство обеспечивает высокие значения коэффициента использования материала, чем выгодно отличается от так называемых «традиционных» (субтрактивных) технологий производства, подразумевающих удаление лишнего вещества из заготовки, как правило, с помощью механической обработки [3]. Один из видов 3D-печати металлами – селективное лазерное сплавление (СЛС). В настоящее время существует множество металлических порошков на основе никеля, кобальта, железа, титана, алюминия и др. [4].

Развитие перспективных технологий производства авиационной техники выявило необходимость обнаружения специфических дефектов, возникающих при новых технологических процессах, в том числе и в деталях, полученных методом СЛС [5, 6]. Как правило, изделия, полученные посредством сплавления, имеют сложную форму, а дефекты, сопровождающие этот процесс, более мелкие, чем при литье [7]. Поэтому для гарантированного обнаружения таких дефектов рентгеновскими методами неразрушающего контроля требуется строгое соблюдение расчетных режимов и параметров, чтобы такой контроль осуществлялся с высокой чувствительностью.

### **Расчет режимов рентгеновского контроля изделий, получаемых методом селективного лазерного сплавления**

#### *Аддитивные технологии*

Аддитивные технологии – это методы послойного получения объектов практически любой формы с помощью компьютерных 3D-технологий. Применение аддитивных технологий в авиастроении позволяет получать изделия достаточно сложной конфигурации без дополнительных сборочных операций и механической обработки, что позволяет создавать сложные многокомпонентные композиции с использованием, например, генеративного дизайна или топологической оптимизации. При этом полностью сохраняются, а в ряде случаев и повышаются, технические и эксплуатационные свойства конечных изделий.

Аддитивные технологии характеризуются двумя признаками. Во-первых, изделия получают путем локального отверждения материала в соответствии со строго определенной траекторией – слой за слоем. Во-вторых, в основе создания изделия лежит цифровая модель. Первый признак называют признаком аддитивности, а второй – признаком виртуальности.

Классифицируют аддитивные технологии по различным принципам, например:

- по материалам (по состоянию поставки: жидкие, порошковые, прутковые; по природе материала: металлические или неметаллические и т. п.);
- по способу отверждения слоя (за счет воздействия температуры, разной длины световых волн, с помощью подачи связующего состава, спекания, сплавления и т. п.);

Однако аддитивное производство, как и любая другая технология, не может гарантировать получение бездефектных деталей, поэтому необходимо выявлять дефекты такого рода.

*Дефекты и причины их возникновения в процессе  
аддитивного производства*

В табл. 1 приведен сводный перечень основных дефектов, подлежащих обнаружению методами неразрушающего контроля, составленный по результатам анализа данных об изделиях, полученных аддитивными методами, из научно-технических источников [6].

Таблица 1

**Виды дефектов и причины их возникновения,  
возможное обнаружение рентгеновскими методами неразрушающего контроля**

Дефект	Причины возникновения
Пористость	Неоптимальный выбор параметров сплавления, наличие примесей в порошке и/или технологической среде, некорректная постобработка, неполное сплавление порошка [8]
Пустоты	Недостаточное количество порошка, нарушение в процессе построения из-за системы управления или неправильной калибровки, неравномерность распределения порошка
Дефекты слоя	Прекращение подачи порошка, ошибки оптических систем (лазер, электронный луч) или данных для построения. Загрязнение технологической среды (перебои подачи защитного газа, нарушение вакуума), смешивание разнородных материалов или повторное использование отработанного порошка без просеивания. Коробление детали в процессе построения [9, 10]
Несплавления	Неоптимальный выбор параметров сплавления, отклонение параметров сплавления от выбранных, изменение размеров и позиционирования лазерного пятна. Коробление детали в процессе синтеза
Трещины	Металлургические причины: градиенты температур и напряжений могут приводить к растрескиванию
Включения	Частицы инструмента (выравнивающего ножа и т. д.) попавшие в зону сплавления, частицы сплавленного порошка, оставшиеся в порошке при плохом просеивании (при повторном использовании порошка), частицы металлического порошка другого состава, оставшиеся в полостях и частях оборудования [10, 11]
Поверхностные дефекты	Неоптимальная ориентация детали в зоне построения, неоптимальные параметры синтеза, нарушения или отклонения размеров и позиционирования лазерного пятна. Коробление детали в процессе синтеза

Даже при оптимальных параметрах отработанного технологического процесса синтеза нельзя исключить вероятность образования дефектов.

*Расчет оптимальной энергии излучения  
при проведении рентгеновского контроля*

В радиационных методах контроля энергия излучения (напряжение на рентгеновской трубке, которое определяет энергию генерируемых фотонов) выбирается по установленным стандартам [12]. Известно соотношение для анодного напряжения и энергии излучения: эффективная энергия ( $E_{эфф}$ , кэВ) численно равна 2/3 максимального напряжения на рентгеновской трубке ( $U_{max}$ , кВ). Это соотношение применимо к излучению рентгеновских аппаратов с напряжением до 1000 кВ вдали от скачков фотоэлектрического поглощения. Анодное напряжение выбирают в зависимости от толщины (имеется ввиду толщина в направлении оси пучка излучения) контролируемого объекта в соответствии с ГОСТ 20426–82. Этот документ применим к алюминиевым, титановым и другими сплавам (табл. 2).

**Область применения рентгеновских аппаратов  
при проведении рентгенографического контроля**

Толщина объекта контроля, мм, в направлении оси пучка излучения из сплавов на основе			Напряжение на рентгеновской трубке, кВ (не более)
железа	титана	алюминия	
0,02	0,05	0,25	20
0,3	0,75	3,75	40
0,4	1	5	50
0,7	2	12	60
1,5	5	29	80
3	8	45	100
6	14	56	120
12	29	60	150
20	45	97	200
23	53	102	250
32	70	128	300
40	90	180	400

Аналогичный регламент существует и в международных нормативных документах. Пользуясь такими алгоритмами, анодное напряжение выбирают так, чтобы радиационное изображение, формируемое за объектом контроля (ОК), имело контраст, который обеспечивает заданную чувствительность контроля.

Излучение, выходящее из окна рентгеновской трубки, имеет дозу  $D_0$ . При взаимодействии излучения с материалом ОК доза меняется. На эти изменения влияет толщина объекта, плотность материала, наличие в нем несплошностей. Таким образом получается радиационное изображение. Процесс получения такого изображения представлен на рис. 1.

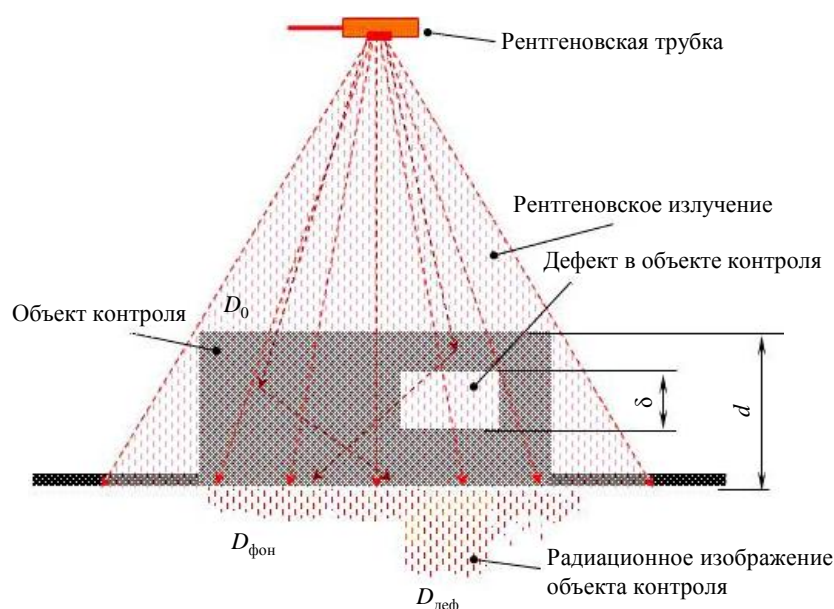


Рис. 1. Схема формирования радиационного изображения

Мерой полезной информации об ОК считают относительную разницу между фоновым и аномальным участками, т. е. контраст радиационного изображения  $K_{\text{рад}}$ :

$$K_{\text{рад}} = \frac{D_{\text{д}} - D_{\text{ф}}}{D_{\text{ф}}} = \frac{\mu \cdot \delta}{B} \quad [13],$$

где  $D_{\text{ф}}$  – доза излучения на фоновом участке;  $D_{\text{д}}$  – доза излучения на участке, соответствующем расположению дефекта;  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления рентгеновского излучения материалом ОК;  $\delta$  – размер дефекта (неплотности) в ОК в направлении оси пучка излучения;  $B$  – фактор накопления рассеянного излучения.

Согласно нормативным документам по радиационным методам неразрушающего контроля, минимальный обнаруживаемый дефект должен быть в 2 раза меньше, чем предельно допустимый дефект в ОК. Такое условие гарантирует обнаружение недопустимого дефекта. По определению, чувствительность контроля  $k$  – минимальный обнаруживаемый дефект, тогда  $k = \frac{\delta}{2}$ . Если размер недопустимого дефекта составляет  $\delta = 0,04d$ , где  $d$  – толщина контролируемого объекта в направлении оси пучка излучения, то необходимая чувствительность контроля  $k = 0,02d$ . При осуществлении рентгенографического контроля с такой чувствительностью на радиографическую пленку класса C5 со средним градиентом  $G = 4$  минимальный оптический контраст равен

$$K_{\text{опт min}} = \frac{S_{\text{д}} - S_{\text{ф}}}{S_{\text{ф}}} = G \cdot K_{\text{рад}},$$

где  $S_{\text{ф}}$  и  $S_{\text{д}}$  – оптическая плотность областей рентгенограммы, соответствующих фону и дефекту, Б (бел).

Согласно критериям международных нормативных документов –  $S_{\text{ф}} \geq 2$  Б. Минимальная разница оптической плотности, фиксируемая зрительной системой оператора, составляет 0,2 Б, тогда

$$K_{\text{рад}} = \frac{K_{\text{опт min}}}{G} = \frac{S_{\text{д}} - S_{\text{ф}}}{S_{\text{ф}}} \cdot \frac{1}{G};$$

$$0,02\mu \cdot d = \frac{2,2 - 2}{2} \cdot \frac{1}{4} = 0,025; \mu \cdot d = \frac{0,025}{0,02} \geq 1,25.$$

Это условие определяет подбор анодного напряжения.

Для контроля отливок из алюминиевых и титановых сплавов, сталей и жаропрочных никелевых сплавов рассчитаны коэффициенты ослабления излучения для этих материалов. Теоретически, для изделий, выполненных по аддитивным технологиям, режимы будут аналогичными. Для доказательства этого предположения проведем расчет коэффициентов линейного ослабления излучения некоторыми металлическими порошками и сравним их с аналогами – литейными сплавами [12].

#### Расчет коэффициентов ослабления

Для расчета выбраны металлические порошковые композиции на основе алюминия, титана, железа и никеля и аналогичные им по химическому составу литейные сплавы, % (по массе):

Сплавы на основе Al с плотностью ~2,65 г/см <sup>3</sup>								
Элемент	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Be	Примеси
Порошок AlSi12 (ISO 18273:2004)	12	0,8	0,3	0,15	0,1	0,2	0,03	–
Литейный AL9-1 (ГОСТ 1583–93)	7–8	0,3	0,3	0,10	0,3	0,2	0,1	0,1Ti; 0,1Zr; 0,1B; 0,03Pb; 0,005Sn

Сплавы на основе Ti с плотностью ~4,47 г/см<sup>3</sup>

Элемент	Al	V	Si	Fe	C
Порошок Ti-6Al-4V (AMS 4911) и литейный BT6 (ГОСТ 19807-91)	6,1	4,4	0,1	0,6	0,1

Сплавы на основе Ni с плотностью ~8,5 г/см<sup>3</sup>

Элемент	Al	Ti	Cr	Co	Ta	W	Примеси
Порошок IN939 (DIN 2.4856)	2,5	4,5	22	20	2,0	3,0	0,25
Литейный 20X25H20C2 (ГОСТ 8559-75; 64 Ni)	6,2	1,25	5,6	8,4	2,5	3,0	5,5Re; 4,8Mo; Nb, Hf, Ru

Сплавы на основе Fe с плотностью ~7,9 г/см<sup>3</sup>

Элемент	Si	C	S	P	Mn	Cr	Ni	Cu	Ca
Порошок 16NiCr4 (DIN 1.5714) и литейный 16XГН (ГОСТ 4543-71)	0,27	0,17	0,035	0,035	1,1	0,5	0,3	0,3	0,03

Расчет линейных коэффициентов ослабления исследуемых сплавов выполняли в соответствии с аналитическим выражением

$$\mu_{\text{спл}} = \left( \frac{\mu_1}{\rho_1} \eta_1 + \frac{\mu_2}{\rho_2} \eta_2 + \dots + \frac{\mu_n}{\rho_n} \eta_n \right) \cdot \rho_{\text{спл}},$$

где  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  – линейные коэффициенты ослабления излучения первым, вторым, ...,  $n$ -м элементами, входящими в состав сплава, см<sup>-1</sup>;  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  – плотность первого, второго, ...,  $n$ -го элементов, входящих в состав сплава, г/см<sup>3</sup>;  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  – относительная массовая доля первого, второго, ...,  $n$ -го элемента, входящего в состав сплава;  $\rho_{\text{спл}}$  – плотность сплава.

Поскольку линейный коэффициент ослабления излучения тем или иным элементом напрямую зависит от энергии излучения ( $E$ ), для каждой металлической композиции и ее литейного аналога выбраны определенные значения энергии излучения, т. е. напряжения на рентгеновской трубке ( $U$ ).

Например, толщина алюминиевых отливок находится в диапазоне от 5 до 55 мм [13, 14]. Согласно требованиям ГОСТ 20426-82, анодное напряжение для этого диапазона толщин составляет от 50 до 120 кВ, что соответствует энергии излучения – от 33,3 до 80 кэВ. Коэффициент ослабления излучения порошка на основе алюминия (AlSi12) и его литейным аналогом сплавом АЛ9-1 рассчитан для трех значений энергии излучения: 30, 50 и 80 кэВ [15].

Для порошка IN939 и жаропрочного сплава 20X25H20C2 на основе никеля, исходя из номенклатуры контролируемых изделий из них, выбраны следующие значения энергии излучения: 60, 100 и 200 кэВ (напряжение на рентгеновской трубке 90, 150 и 300 кВ соответственно). Аналогично для материалов на основе титана (Ti-6Al-4V и BT6) и железа (16NiCr4 и сталь 16XГН) выбраны значения энергии излучения: 40, 80 и 150 кэВ, что соответствует значениям анодного напряжения 60, 120 и 210 кВ.

Получены следующие значения линейных коэффициентов ослабления излучения металлическими порошками  $\mu_{\text{МПК}}$  и литейными сплавами  $\mu$ , см<sup>-1</sup>.

Сплавы на основе Al ( $\rho \approx 2,65$  г/см<sup>3</sup>)

Параметры излучения		Порошок AlSi12	Литейный АЛ9-1
$E$ , кэВ	$U$ , кВ		
30	50	5,761	5,440
50	75	1,38	1,513
80	120	0,602	0,698

Сплавы на основе Ti ( $\rho \approx 4,47 \text{ г/см}^3$ )

Параметры излучения		Порошок Ti-6Al-4V	Литейный BT6
$E, \text{ кэВ}$	$U, \text{ кВ}$		
40	60	9,72	9,25
80	120	2,29	1,74
140	210	1,23	0,712

Сплавы на основе Fe ( $\rho \approx 7,9 \text{ г/см}^3$ )

Параметры излучения		Порошок 16NiCr4	Литейный 16ХГН
$E, \text{ кэВ}$	$U, \text{ кВ}$		
40	60	9,59	12,12
80	120	2,41	3,75
140	210	1,18	1,17

Сплавы на основе Ni ( $\rho \approx 8,5 \text{ г/см}^3$ )

Параметры излучения		Порошок IN939	Литейный 20Х25Н20С2
$E, \text{ кэВ}$	$U, \text{ кВ}$		
60	90	12,29	12,21
100	150	4,05	4,61
200	300	1,37	1,52

На рис. 2 показаны зависимости линейных коэффициентов ослабления излучения от напряжения на рентгеновской трубке для порошка, литейного сплава и чистого металла – основы этих сплавов.

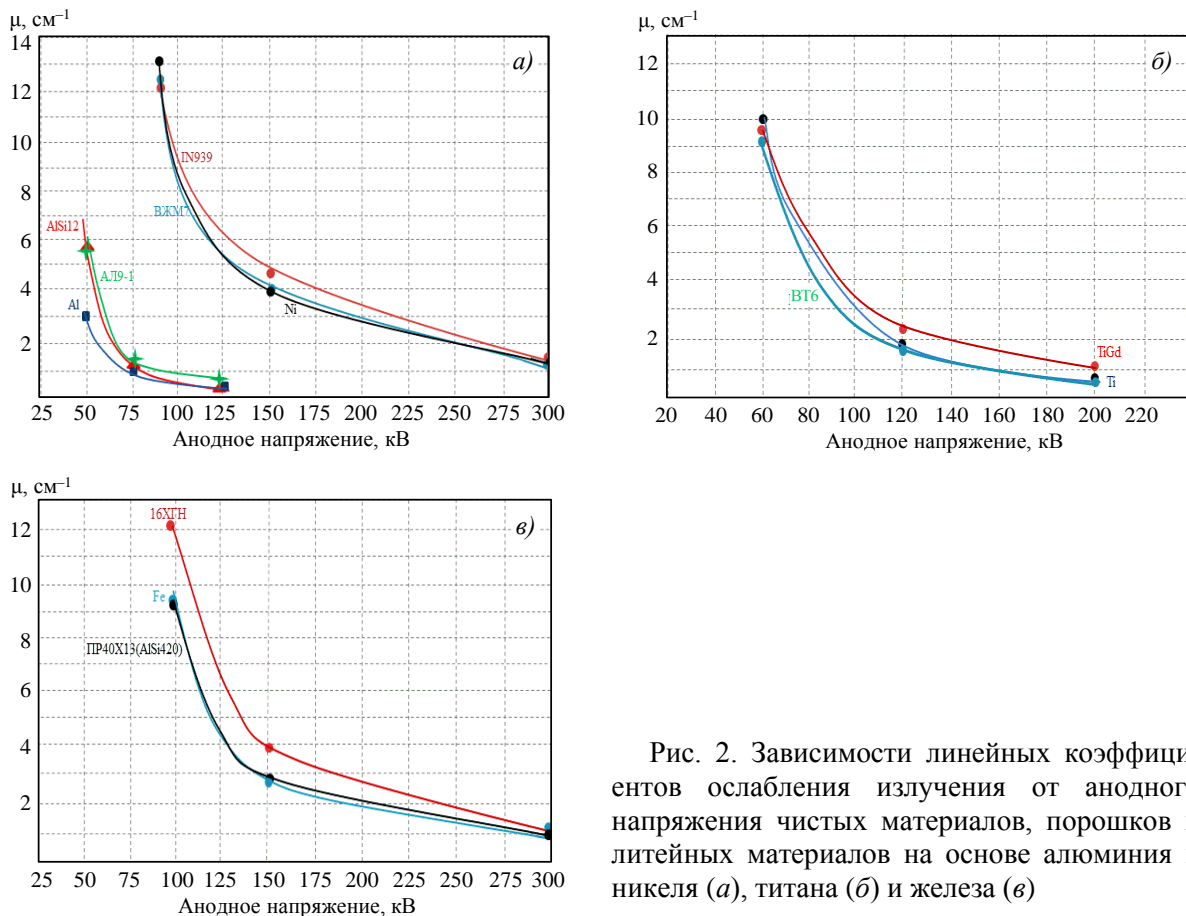


Рис. 2. Зависимости линейных коэффициентов ослабления излучения от анодного напряжения чистых материалов, порошков и литейных материалов на основе алюминия и никеля (а), титана (б) и железа (в)

Анализ графиков, приведенных на рис. 2, показывает, что коэффициенты ослабления порошков, их литейных аналогов и чистых металлов близки между собой настолько, что выбор режима контроля для изделий, полученных аддитивными методами, можно осуществлять, пользуясь ГОСТ 20426–82 или ГОСТ ISO 17636:1–2017 [13, 16].

*Примеры расчета линейных коэффициентов ослабления излучения*

Пример 1. При рентгеновском контроле объекта из сплава на основе железа толщиной 6 мм, ГОСТ 20426–82 регламентирует выбирать анодное напряжение не более 120 кВ. Согласно рис. 2, а, при анодном напряжении 120 кВ значение  $\mu_{16\text{NiCr4}} = 2,41\text{см}^{-1}$ , тогда

$$\mu_{16\text{NiCr4}} \cdot d_{16\text{NiCr4}} = 2,41 \cdot 0,6 = 1,446.$$

Поскольку  $1,446 > 1,25$ , то выполняется условие, при котором сформированное радиационное изображение обеспечит оптическое изображение объекта контроля с чувствительностью  $0,02 \cdot d$  (2 % от просвечиваемой толщины).

Пример 2. При рентгеновском контроле объекта из сплава на основе алюминия толщиной 12 мм, ГОСТ 20426–82 регламентирует выбирать анодное напряжение не более 60 кВ. Согласно рис. 2, а, при анодном напряжении 60 кВ значение  $\mu_{\text{AlSi12}} = 2,94\text{см}^{-1}$ , тогда

$$\mu_{\text{AlSi12}} \cdot d_{\text{AlSi12}} = 2,94 \cdot 1,2 = 3,53.$$

Поскольку  $3,53 > 1,25$ , то выполняется условие, при котором сформированное радиационное изображение обеспечит оптическое изображение объекта контроля с чувствительностью  $0,02 \cdot d$  (2 % от просвечиваемой толщины).

Пример 3. На рис. 3 представлена рентгенограмма фрагмента детали, полученной по технологии аддитивного производства, на основе железа толщиной 6 мм при просвечивании по режиму: напряжение 120 кВ, ток 7,5 мА с продолжительностью экспозиции, равной 1,5 мин.

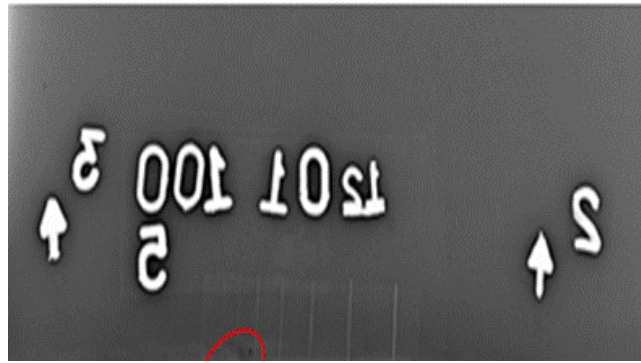


Рис. 3. Рентгенограмма фрагмента изделия толщиной 6 мм, изготовленного методом селективного лазерного сплавления из порошка на основе железа

Видно, что достигнута чувствительность контроля 0,12 мм (2 %). При этом использован режим, регламентируемый нормативными документами для отливок изделий из стали.

**Заключения**

На основании проведенных расчетов и экспериментов установлено, что при контроле изделий, выполненных по аддитивным технологиям, следует выбирать режимы

контроля, регламентированные нормативными документами для изделий, полученных литьем. Для порошков из железа следует пользоваться рекомендациями, представленными в нормативно-технических документах (НТД) на стали, из алюминия – на литейные алюминиевые сплавы, из титана – на литейные титановые сплавы и т. д.

Проведенные расчеты предполагают внесение поправок и дополнений в действующие НТД, на основании которых будут составлены рекомендации и регламенты по рентгеновскому контролю изделий, полученных аддитивными методами.

В ГОСТ 20426–82 приведена табл. 2: область применения рентгеновских аппаратов, которая может использоваться при разработке технологических карт контроля изделий из порошков. По требованиям ГОСТ ISO выбор анодного напряжения осуществляется посредством размещенной в нем диаграммы, которая также может быть использована при разработке технологических карт контроля.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

*Работы (исследования) выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение № 075-11-2021-085 от 22.12.2021).*

#### Список источников

1. Сироткин О.С. Современное состояние и перспективы развития аддитивных технологий // *Авиационная промышленность*. 2015. № 2. С. 22–25.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электromеталлургия*. 2022. № 1. С. 2–12.
3. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения. СПб.: Питер, 2015. 348 с.
4. Зеленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.М. Аддитивные технологии в машиностроении. СПб.: СПбПУ, 2013. 222 с.
5. Seifi M., Gorelik M., Waller J. et al. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification // *JOM*. 2017. No. 69 (3). P. 439–455.
6. Waller J.M., Parker B.H., Hodges K.L. et al. Non-Destructive Testing Methods for Products by Additive Manufacturing // *Journal of the Korean Society for Nondestructive testing*. 2016. Vol. 36. Is. 4. P. 308–314.
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // *Вестник Российской академии наук*. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
8. Неруш С.В., Капланский Ю.Ю., Дынин Н.В., Бенариев И., Савичев И.Д. Разработка параметров селективного лазерного сплавления, структура и механические свойства высокопрочного алюминиевого сплава системы Al–Ce–C // *Труды ВИАМ*. 2023. № 1 (119). Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.05.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-50-68.
9. Сухов Д.И., Капланский Ю.Ю., Рогалев А.М., Куркин С.Э. Особенности получения высокохромистых сплавов на основе никеля методом селективного лазерного сплавления // *Труды ВИАМ*. 2023. № 1 (119). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.05.2024). DOI: 10.18557/2307-6046-2023-0-1-15-27.
10. Евгенов А.Г., Шуртаков С.В., Чуманов И.Р. Новый износостойкий сплав на кобальтовой основе: особенности структуры металла, полученного методом ПЛВ. Часть 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 3 (68). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-37-49.

11. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 2 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.05.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.
12. Шаблов С. В., Косарина Е.И., Михайлова Н.А., Демидов А.А. Физические основы и практика радиационного неразрушающего контроля. М.: Спектр, 2023. 168 с.
13. ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения. М.: Изд-во стандартов, 1982. 23 с.
14. Демидов А.А., Степанов А.В., Турбин Е.М., Крупнина О.А. О режимах рентгеновского контроля, обеспечивающих формирование радиационных изображений с заданным контрастом // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № 4 (45). С. 80–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-80-85.
15. Степанов А.В., Косарина Е.И. Требования рентгенографического неразрушающего контроля в российских и зарубежных стандартах // *Комментарии к стандартам, ТУ, сертификатам*. 2013. № 9. С. 2–7.
16. ГОСТ ISO 17636:1–2017. Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением пленки. М.: Стандартинформ, 2022. 36 с.

#### References

1. Sirotkin O.S. Current state and development prospects of additive technologies. *Aviatsionnaya promyshlennost*, 2015, no. 2, pp. 22–25.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12.
3. Shishkovsky I.V. *Fundamentals of high-resolution additive technologies*. St. Petersburg: Piter, 2015, 348 p.
4. Zelenko M.A., Popovich A.A., Mutylyna I.M. *Additive technologies in mechanical engineering*. St. Petersburg: SPbPU, 2013, 222 p.
5. Seifi M., Gorelik M., Waller J. et al. Progress towards metal additive manufacturing standardization to support qualification and certification. *JOM*, 2017, no. 69 (3), pp. 439–455.
6. Waller J.M., Parker B.H., Hodges K.L. et al. Non-Destructive Testing Methods for Products by Additive Manufacturing. *Journal of the Korean Society for Nondestructive testing*, 2016, vol. 36, is. 4, pp. 308–314.
7. Kablov E.N. New generation materials and digital technologies for their processing. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 90, no. 4, pp. 331–334.
8. Nerush S.V., Kaplanskii Yu.Yu., Dynin N.V., Benarieb I., Savichev I.D. Development of laser powder bed fusion parameters, structure and mechanical properties of a high-strength aluminum alloy Al–Ce–Cu. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-50-68.
9. Sukhov D.I., Kaplansky Yu.Yu., Rogalev A.M., Kurkin S.E. The features of processing Cr-rich nickel based alloy by selective laser melting. *Trudy VIAM*, 2023, no. 1 (119), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 13, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-1-15-27.
10. Evgenov A.G., Shurtakov S.V., Chumanov I.R. New wear-resistant cobalt-base alloy: features of the structure of the metal obtained by the direct laser growth method. Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 3 (68), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-37-49.
11. Svetlov I.L., Petrushin N.V., Epishin A.I., Karashaev M.M., Elyutin E.S. Single crystals of nickel-based superalloys alloyed with rhenium and ruthenium (review). Part 2. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 13, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-3-22.

12. Shablov S.V., Kosarina E.I., Mikhailova N.A., Demidov A. A. *Physical foundations and practice of radiation non-destructive testing*. Moscow: Spektr, 2023, 168 p.
13. State Standard 20426–82. *Non-destructive testing. Radiation flaw detection methods. Scope*. Moscow: Publ. House of Standards, 1982, 23 p.
14. Demidov A.A., Stepanov A.V., Turbin Ye.M., Krupnina O.A. The x-ray testing modes providing with radiation imaging with predetermined contrast. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. 4 (45), pp. 80–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-4-80-85.
15. Stepanov A.V., Kosarina E.I. Requirements for radiographic non-destructive testing in Russian and foreign standards. *Kommentarii k standartam, TU, sertifikatam*, 2013, no. 9, pp. 2–7.
16. Gtate Standard ISO 17636:1–2017. *Non-destructive testing of welded joints. Radiographic testing. Part 1. Methods of X-ray and gamma-ray testing using film*. Moscow: Standartinform, 2022, 36 p.

#### *Информация об авторах*

**Косарина Екатерина Ивановна**, главный научный сотрудник, д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Гримова Анна Павловна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Осияненко Наталья Викторовна**, инженер 3 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Смирнов Алексей Владимирович**, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

#### *Information about the authors*

**Ekaterina I. Kosarina**, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anna P. Grimova**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Nataliya V. Osiyanenko**, Third Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Alexei V. Smirnov**, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 22.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.09.2024.  
The article was submitted 22.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 10.09.2024.