

Научная статья

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-119-129

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНОК*Н.В. Осияненко¹, Е.И. Косарина¹, А.А. Демидов¹, А.П. Гримова¹*

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

Аннотация. Представлено описание испытания радиографических технических пленок по регламенту ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 и по методике, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Проведено сравнение полученных информативных характеристик радиографических пленок. Показано, что получение характеристической кривой по требованиям ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 не учитывает влияния энергии рентгеновского излучения. Аналог характеристической кривой, построенной по разработанной методике, учитывает зависимость от энергии излучения, т. е. определяет не только сенситометрические, но и дефектоскопические свойства.

Ключевые слова: радиографическая пленка, оптическая плотность, характеристическая кривая, сенситометрические характеристики, градиент, чувствительность к излучению

Для цитирования: Осияненко Н.В., Косарина Е.И., Демидов А.А., Гримова А.П. Определение характеристик радиографических пленок // Труды ВИАМ. 2025. № 7 (149). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-119-129.

Scientific article

DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF RADIOGRAPHIC FILMS*N.V. Osiyanenko¹, E.I. Kosarina¹, A.A. Demidov¹, A.P. Grimova¹*

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

Abstract. The article describes the testing of radiographic technical films according to the regulations of GOST R ISO 11699-1-2023 and according to the method developed at NRC «Kurchatov Institute» – VIAM. The obtained informative characteristics of radiographic films are compared. The article shows that obtaining a characteristic curve according to the requirements of GOST R ISO 11699-1-2023 does not take into account the influence of X-ray radiation energy. The properties of the analog of the characteristic curve according to the developed method take into account its dependence on the radiation energy, i.e. it determines not only its sensitometric properties, but also its flaw detection properties.

Keywords: radiographic film, optical density, characteristic curve, sensitometric characteristics, gradient, speed to radiation

For citation: Osiyanenko N.V., Kosarina E.I., Demidov A.A., Grimova A.P. Determination of characteristics of radiographic films. *Trudy VIAM*, 2025, no. 7 (149), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-119-129.

Введение

Многие современные агрегаты, детали и машины работают в экстремальных условиях: при высоких температурах и больших силовых нагрузках, которые зачастую имеют не статический, а циклический характер. С каждым годом рабочие условия лишь усложняются, а требования к безопасности эксплуатации ужесточаются [1]. Особенно это заметно в таких быстро развивающихся отраслях, как авиация, космос и атомная энергетика, где зачастую требуется проведение 100%-ного контроля деталей в партии, что может обеспечить только неразрушающий контроль [2, 3]. Одним из основных видов неразрушающего контроля, широко применяемых в производстве изделий авиационной техники, является рентгеновский, основанный на ослаблении рентгеновского излучения материалами. Степень ослабления зависит от свойств изделия и материала, из которого оно изготовлено: чем больше плотность материала, чем толще слой поглотителя, тем сильнее степень ослабления рентгеновского излучения. Теневая картина представляет собой распределение экспозиционной дозы или экспозиционной мощности дозы излучения. Радиационное теневое изображение чаще всего регистрируется на радиографическую пленку, свойства которой существенно влияют на результат контроля.

Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 15-ст от 17.01.2023 введен в действие ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023 в качестве национального стандарта Российской Федерации. Данный стандарт регламентирует классификацию пленочных систем, правила ее применения, обработки и оценки качества [4]. Рентгеновский неразрушающий контроль с применением в качестве детектора радиографической пленки используют практически на всех предприятиях, производящих авиационную и космическую технику.

Нормативными документами, действующими в указанных отраслях, регламентировано применение радиографических пленок классов С1–С4. При контроле объектов большой толщины с применением высокой энергии рентгеновского излучения (>180 кэВ) допускается использование радиографической пленки класса С5. Применение радиографической пленки строго определенного класса обеспечивает надежное обнаружение дефектов, что гарантирует безопасную эксплуатацию летательных аппаратов.

Для установления классификации радиографических технических пленок необходимы, во-первых, сложные технические средства, которые являются средствами измерений, во-вторых, юридические документы, определяющие право на проведение таких испытаний. В России на данный момент проводятся работы по созданию средств испытаний радиографических пленок, но пока право их сертификации отсутствует. Таким правом обладает Берлинский Федеральный институт исследований и испытаний материалов (ВАМ), который в условиях действующих санкций недоступен, как и недоступны радиографические пленки с подтвержденной им классификацией. На рынок поступают отечественные и зарубежные радиографические пленки, не прошедшие испытания в ВАМ. Для оценки качества радиографических пленок в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ разработана и много лет применяется собственная методика испытаний [5]. В данной статье приведено описание исследований адекватности разработанной методики по отношению к испытаниям в ВАМ.

Испытания радиографических пленок в соответствии с ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023 и разработанной методикой и их сравнение

Характеристическая кривая радиографической пленки

Сенситометрические свойства радиографической пленки иллюстрирует характеристическая кривая – зависимость оптической плотности D от логарифма экспозиционной дозы излучения K_S (рис. 1) [6, 7]. Имея в распоряжении характеристические кривые, можно определить следующие свойства пленки:

- ширина K_{S1} (диапазон дозы излучения, ослабленной диапазоном толщины объекта контроля, который при экспонировании на данную радиографическую пленку позволяет получить снимок с оптической плотностью, пригодной для его расшифровки);
- чувствительность к излучению S (способность получать требуемую оптическую плотность при определенной дозе излучения), $S = 1/K_S$, где $K_S = 10^{\lg K_S}$;
- средний градиент G (показатель контрастных свойств), $G = \operatorname{tg} \alpha$, где α – угол наклона касательной к характеристической кривой;
- оптическая плотность вуали D_0 (оптическая плотность снимка на неэкспонированной радиографической пленке) [8].

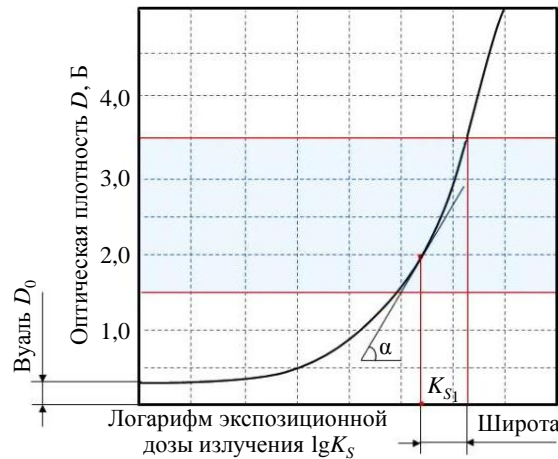


Рис. 1. Характеристическая кривая радиографической пленки

Способ получения характеристической кривой по ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023

Зависимость величины дозы излучения, генерируемой рентгеновским аппаратом, от режима его работы выражается соотношением

$$K_S = \frac{kf(U)It}{F^2},$$

где k – константа, определяемая конструкцией рентгеновского аппарата; $f(U)$ – возрастающая функция от анодного напряжения; U – анодное напряжение, кВ; I – ток рентгеновской трубки, мА; t – продолжительность экспонирования, с; F – расстояние от анода рентгеновской трубки до кассеты с испытуемой пленкой, мм. Величины k и $f(U)$ определяются экспериментально.

Чтобы получить адекватную зависимость $D = f(\lg K_S)$, на одном и том же образце пленки выполнили ряд экспозиций при определенном режиме: анодное напряжение 200 кВ, анодный ток 10 мА, фокусное расстояние 700 мм. Меняя продолжительность экспонирования, получили сенситограмму, содержащую не менее восьми равномерно распределенных оптических плотностей, охватывающих интервал от 1,0 до 4,5 Б, и превышающих D_0 . Затем построенную зависимость $D = f(\lg K_S)$ аппроксимировали полиномом третьей степени. Полиномиальная аппроксимация должна включать все измеренные значения от 1,0 до 4,5 Б. Чтобы определить среднее значение градиента G , на каждом поле с определенной оптической плотностью необходимо выполнить не менее шести измерений. Средние значения градиента должны определяться с максимальной неопределенностью $\pm 5\%$ для градиента при $D = 2$ Б над плотностью вуали и основы и $\pm 7\%$ для градиента при $D = 4$ Б над плотностью вуали и основы на 95%-ном доверительном интервале [9, 10].

Согласно методике построения характеристических кривых испытуемой пленки по ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023, при строго определенных условиях получают

рентгеновские снимки, экспонирование которых осуществляют при постоянной мощности дозы рентгеновского излучения и 12 разных продолжительностях. При указанных условиях оптическая плотность полученных рентгеновских снимков должна быть равномерно распределена в интервале от 1,0 до 4,5, Б, превышающем плотность вуали D_0 .

Доза излучения K_S , создаваемая рентгеновским аппаратом, пропорциональна мощности P и продолжительности работы t :

$$K_S = Pt.$$

При проведении испытаний радиографических пленок по ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023 мощность дозы постоянна, меняется продолжительность работы рентгеновского аппарата.

Получение аналога характеристической кривой по разработанной методике

Испытания проводили на радиографической пленке класса С4. Для получения зависимости оптической плотности от логарифма экспозиционной дозы излучения использовали специальные образцы в виде ступенчатых клиньев из магния и стали (табл. 1, рис. 2).

Таблица 1

Технические характеристики испытательных образцов

Условный номер ступеньки	Толщина ступеньки, мм, для ступенчатого клина		
	из магниевого сплава	стального	
		1	2
1	3	2	14
2	8	4	18
3	10	6	22
4	15	8	26
5	19	10	30
6	23	12	34
7	26	14	38

Примечание. Каждая ступенька клина содержит плоскостонные лунки глубиной 1, 2, 3, 5, 7, 10 % от высоты ступеньки (рис. 2).

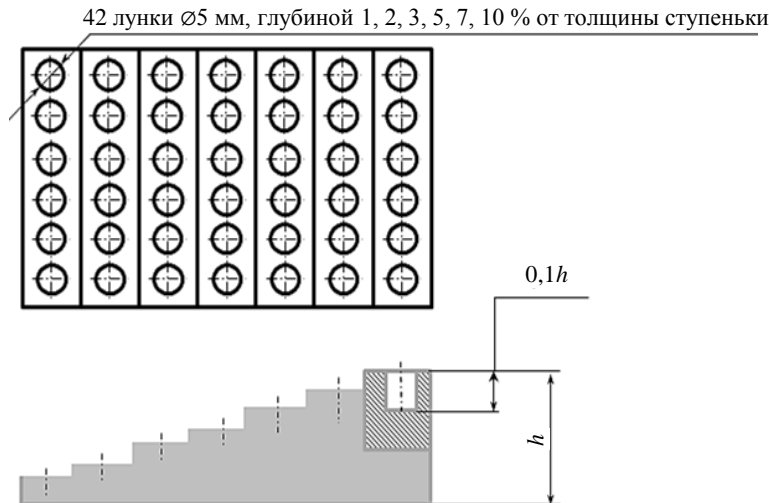


Рис. 2. Эскиз ступенчатого клина для определения сенситометрических свойств радиографических пленок

Для определения сенситометрических характеристик испытуемой радиографической пленки проводят экспонирование образцов при режимах, представленных в табл. 2 и на рис. 3.

Таблица 2

Режимы экспонирования испытательных образцов

Ступенчатый клин	Напряжение, кВ	Анодный ток, мА	Продолжительность, мин
Из магниевого сплава	40	15	2
Стальной 1	120		
Стальной 2	200		

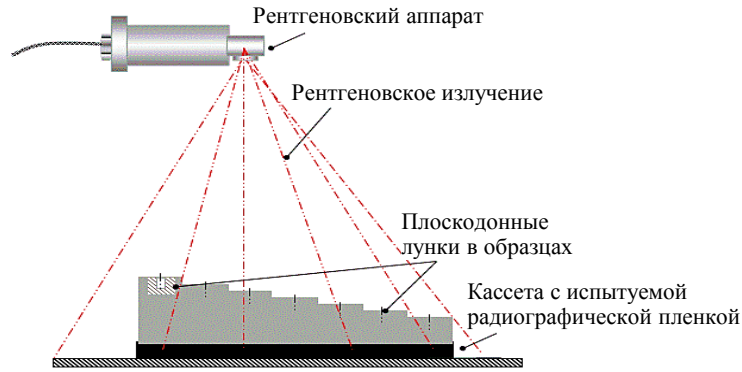


Рис. 3. Схема экспонирования ступенчатого стального клина 1 и 2

Каждая ступенька испытательных образцов получает определенную дозу излучения $K_{Сспл} = P_{спл}t$. В зависимости от толщины ступеньки и плотности сплава образца мощность дозы за ней определяется соотношением

$$K_{Сспл} = P_{спл}t = P_{0спл}te^{-\mu_{спл}d_{испл}},$$

где $P_{0спл}$ и $P_{спл}$ – мощность экспозиционной дозы излучения в отсутствии и при наличии поглотителя соответственно, Гр/с; $\mu_{спл}$ – линейный коэффициент поглощения излучения сплавом; $d_{испл}$ – толщина ступеньки образца, мм.

Согласно разработанной методике, в отличие от изложенной в ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023, изменение оптической плотности полей сенситограммы происходит за счет изменения мощности дозы излучения, которая при достижении радиографической пленки ослабевает в результате прохождения сквозь ступеньки испытательного образца.

Значения $\mu_{спл}d_{испл}$ для всех испытательных образцов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты экспонирования испытательных образцов

Параметр	Значения параметров							
Ступенчатый клин из магниевого сплава ($U = 40$ кВ, $E = 26,3$ кэВ, $\mu_{Mg} = 3,234$ см ⁻¹)								
d_{iMg} , см	0,30	0,80	1,00	1,50	1,90	2,20	2,60	2,60
$\mu_{Mg}d_{iMg}$	0,97	2,59	3,23	4,85	6,14	7,11	8,41	8,41
D_{iMg} , Б	>4,00	2,21	1,01	0,62	0,50	0,38	<0,10	<0,10
Стальной ступенчатый клин 1 ($U = 120$ кВ, $E = 80$ кэВ, $\mu_{Fe} = 4,67$ см ⁻¹)								
d_{iFe} , см	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,40
$\mu_{Fe}d_{iFe}$	0,93	1,87	2,80	3,74	4,67	5,60	6,54	6,54
D_{iFe} , Б	>4,00	4,06	2,27	1,56	1,03	0,73	0,60	0,60
Стальной ступенчатый клин 2 ($U = 200$ кВ, $E = 134$ кэВ, $\mu_{Fe} = 1,88$ см ⁻¹)								
d_{iFe} , см	1,40	1,80	2,20	2,60	3,00	3,40	3,80	3,80
$\mu_{Fe}d_{iFe}$	2,63	3,38	4,14	4,89	5,64	6,40	7,14	7,14
D_{iFe} , Б	>4,00	>4,00	3,20	2,56	1,98	1,64	–	–
Примечание. U – анодное напряжение, E – энергия излучения, μ – линейный коэффициент поглощения излучения образцом, d_i – толщина ступеньки образца, D_i – оптическая плотность.								

Логарифм дозы излучения за каждой ступенькой испытательного образца рассчитывается по формуле

$$\lg K_{S_{\text{спл}}} = \lg(P_{0\text{спл}} \cdot t) + \lg e^{-\mu_{\text{спл}} d_{\text{спл}}} = \lg P_{0\text{Mg}} + \lg t - 0,435 \mu_{\text{Mg}} d_{\text{Mg}}.$$

Для одного рентгеновского аппарата при постоянных значениях тока, продолжительности экспозиции и фокусного расстояния мощность экспозиционной дозы зависит от анодного напряжения в определенных пределах:

$$P_0 = f(U) \frac{It}{F^2}.$$

Аналитически зависимость мощности экспозиционной дозы от анодного напряжения представляет собой сложную функцию, поэтому ее установили экспериментально, а зависимость ее логарифма от анодного напряжения рассчитали (рис. 4).

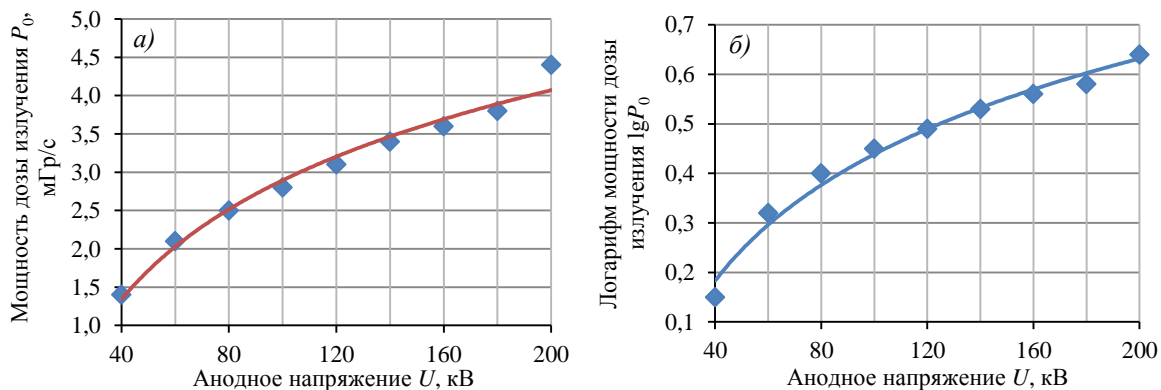


Рис. 4. Зависимости мощности экспозиционной дозы излучения (а) и ее логарифма (б) от анодного напряжения

При экспонировании ступенчатого клина из сплава на основе магния при анодном напряжении 60 кВ мощность экспозиционной дозы составила $P_0 = 2,1$ мГр/с ($\lg P_0 = 0,32$). Логарифм дозы излучения за каждой ступенькой магниевых образцов при анодном напряжении 60 кВ рассчитан по формуле:

$$\lg K_{S_{\text{Mg}}} = 0,32 + 2,08 - 1,41 d_{\text{Mg}}.$$

В результате получены зависимости оптической плотности сенситограмм при экспонировании образцов от логарифма дозы излучения при анодном напряжении 40 кВ (табл. 4 и рис. 5).

Условия получения характеристической кривой по ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023

Образцы пленок экспонировали рентгеновским излучением, генерируемым рентгеновской трубкой с вольфрамовым анодом. Фильтр трубки, наряду с дополнительным медным фильтром, расположенным по возможности максимально близко к мишени, обеспечил фильтрацию, равноценную медному фильтру толщиной $8,00 \pm 0,05$ мм. Напряжение на рентгеновской трубке подбирали таким образом, чтобы медный фильтр толщиной $3,5 \pm 0,2$ мм являлся слоем половинного ослабления и доза излучения на выходе соответствовала половине дозы на входе. Этому требованию соответствует напряжение ~ 220 кВ, анодный ток 10 мА, общая продолжительность экспонирования 2 мин. Экспонирование пленки осуществляли с использованием сенситометра – специального устройства, с помощью которого разные участки радиографической

пленки получали разную дозу излучения. Полученная после фотообработки рентгенограмма называется сенситограммой. Сенситограмма содержит восемь участков с различной оптической плотностью D . Для каждого участка сенситограммы оптическая плотность тем выше, чем больше длина участка диафрагмы сенситометра, так как продолжительность экспонирования радиографической пленки зависит от длины участка диафрагмы сенситометра. Таким образом, получены характеристические кривые, построенные на основании экспериментальных данных (рис. 5) [5, 10, 12].

Таблица 4

Зависимость оптической плотности от логарифма дозы излучения

Параметр	Значения параметров							
Клин из магниевого сплава ($U = 60$ кВ, $I = 10$ мА, $t = 2$ мин = 120 с, $\mu_{Mg} = 3,234$ см ⁻¹)								
d_{iMg} , см	0,30	0,80	1,00	1,50	1,90	2,20	2,60	
$0,435\mu_{Mg}d_{iMg}$	0,42	1,13	1,40	2,11	2,67	3,09	3,66	
$\lg K_{S_iMg}$	-0,12	-0,83	-1,10	-1,81	-2,37	-2,79	-3,36	
D_{iFe} , Б	>4,00	2,21	1,01	0,62	0,50	0,38	0,30	
Стальной ступенчатый клин 1 ($U = 200$ кВ, $I = 10$ мА, $t = 2$ мин = 120 с, $\mu_{Fe} = 1,99$ см ⁻¹)								
d_{iFe} , см	1,40	1,80	2,20	2,60	3,00	3,40	3,80	
$0,435\mu_{Fe}d_{iFe}$	1,14	1,47	1,80	2,13	2,44	2,78	3,11	
$\lg K_{S_iFe}$	-0,50	-0,83	-1,16	-1,49	-1,80	-2,14	-2,62	
D_{iFe} , Б	>4,00	>4,00	3,20	2,56	1,98	0,30	0,30	
Стальной ступенчатый клин 2 ($U = 120$ кВ, $I = 10$ мА, $t = 2$ мин = 120 с, $\mu_{Fe} = 4,67$ см ⁻¹)								
d_{iFe} , см	0,20	0,40	0,60	0,8	1,0	1,2	1,4	
$0,435\mu_{Fe}d_{iFe}$	0,93	1,86	2,80	3,73	4,67	5,60	6,54	
$\lg K_{S_iFe}$	-0,40	-0,81	-1,22	-1,62	-2,02	-2,43	-2,84	
D_{iFe} , Б	4,90	4,53	4,06	2,71	1,83	1,25	0,91	
Характеристическая кривая, построенная по ГОСТ Р ИСО 11699–2023 [11]								
$\lg K_S$	1,144	1,470	1,800	2,127	2,435	2,784	3,106	
D_i , Б	5,17	3,75	2,82	2,23	1,84	1,50	1,26	
Примечание. U – анодное напряжение, I – анодный ток, t – продолжительность экспонирования, μ – линейный коэффициент поглощения излучения образцом, d_i – толщина ступеньки образца, K_S – экспозиционная доза излучения, D_i – оптическая плотность.								

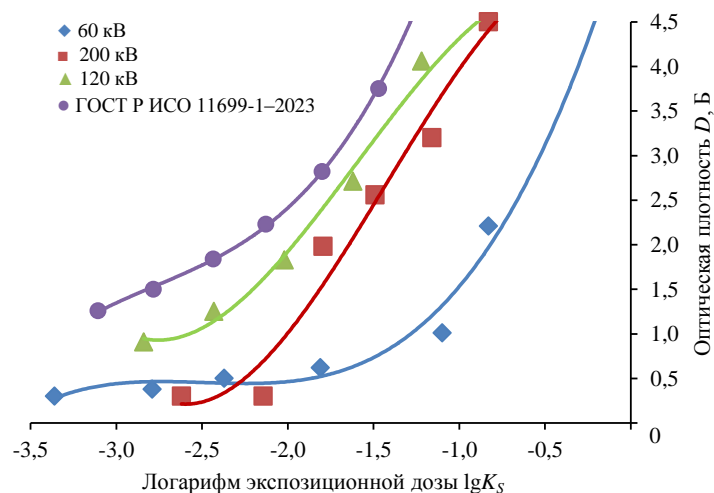


Рис. 5. Зависимости оптической плотности от логарифма дозы излучения для радиографической пленки D5, полученные экспериментально по разработанной методике при различном анодном напряжении и по ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023

**Анализ результатов испытания радиографической пленки
по разработанной методике**

При испытании радиографических пленок по разработанной методике абсолютная величина доз излучения была такой же, как при испытании по регламенту ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023. Однако излучение качественно было другим, так как состояло из фотонов разной энергии. Таким образом, величина доз излучения не менялась, но энергия фотонов, составляющих дозы излучения при разных анодных напряжениях (от 40 до 200 кВ), менялась от 26,0 до 133,3 кэВ. Чем меньше энергия дозы излучения, тем менее чувствительна радиографическая пленка к воздействию излучения. Кривые зависимости $D = f(\lg K_S)$ при уменьшении энергии излучения смещаются вправо (рис. 5).

По определению градиент характеристической кривой пленки численно равен тангенсу угла наклона касательной к кривой при значении оптической плотности 2 и 4 Б. Из рис. 4 видно, что при испытании радиографической пленки класса С4 эта величина меняется при изменении энергии излучения при одной и той же дозе и значительно отличается от $\text{tg}\alpha_{D=2}$ для кривой $D = f(\lg K_S)$, полученной по ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023. Чтобы избежать влияния масштаба на рис. 4, примем величину $\text{tg}\alpha_{D=2}$ для кривой $D = f(\lg K_S)$, полученной по ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023, за единицу и относительно этой величины определим $\text{tg}\alpha_{D=2}$ для кривых $D = f(\lg K_S)$, полученных при анодном напряжении 200, 120 и 40 кВ. Результаты представлены на рис. 6.

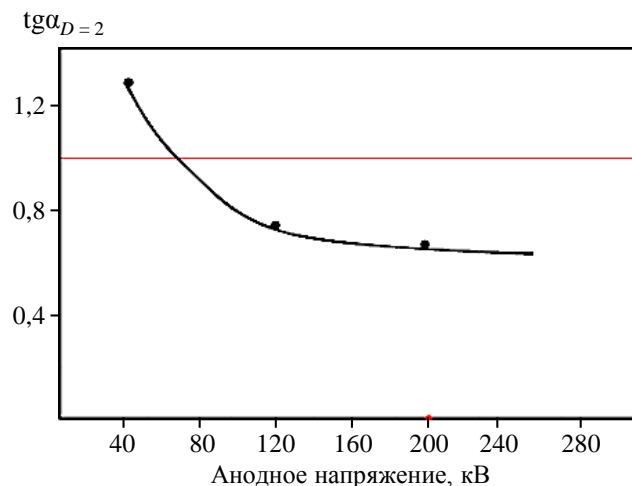


Рис. 6. Зависимости $\text{tg}\alpha_{D=2}$ для кривых $D = f(\lg K_S)$, полученных при разном анодном напряжении (—) и согласно ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023 (—)

Этот факт объясняется тем, что, помимо контрастных свойств собственно радиографической пленки, на изображение влияет контраст радиационного изображения испытательных образцов, зависящий в значительной степени от линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения материалами. Контраст радиационного изображения аналитически выражается зависимостью

$$K_{\text{рад}} = \frac{\mu(E)\Delta d}{B},$$

где Δd – изменение толщины ступенек испытательных образцов; B – фактор накопления рассеянного излучения; E – энергия фотонов рентгеновского излучения.

Таблица 5

Зависимость линейного коэффициента ослабления излучения от энергии излучения

Энергия излучения, кэВ	Линейный коэффициент ослабления излучения, см ⁻¹		Энергия излучения, кэВ	Линейный коэффициент ослабления излучения, см ⁻¹	
	магнием	железом		магнием	железом
10	37,606	1405,15	60	0,440	9,420
15	11,334	461,58	80	0,334	4,671
20	4,857	206,46	100	0,292	2,920
30	1,612	64,84	150	0,242	1,539
40	0,832	28,574	200	0,218	1,146
50	0,561	15,150	300	0,186	0,864

Примечание: Энергия излучения численно равна 2/3 анодного напряжения.

Зависимость коэффициентов линейного ослабления от энергии рентгеновского излучения (анодного напряжения) представлена в табл. 5.

Заключения

Проанализированы результаты испытаний пленок по регламенту ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 и по методике, разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. И те и другие испытания направлены на определение сенситометрических характеристик пленочных систем. Испытания проведены для пленочной системы класса С4. Исходя из свойств пленочных систем, справедливо считать возможным распространение испытаний на классы С1–С5.

Сравнение полученных результатов показало, что качественно испытания, проводимые по регламенту ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 и разработанной методике, позволяют определить такие характеристики, как:

- характеристическую кривую (непосредственно по регламенту ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 и опосредованно по разработанной методике);
- чувствительность к излучению;
- контрастные свойства пленок.

Существенным различием результатов испытаний является тот факт, что ГОСТ Р ИСО 11699-1-2023 не учитывает зависимости сенситометрических свойств от энергии излучения [13–15]. При проведении рентгенографического контроля и выборе пленочной системы следует учитывать, что градиент радиографической пленки зависит от энергии излучения. Контрастные свойства радиографической пленки при контроле объектов, требующих высоких значений анодного напряжения, могут оказаться существенно ниже, чем заявленные принадлежностью пленочной системы к определенному классу [16].

С другой стороны, разработанная методика не предусматривает определения гранулярности пленочной системы ввиду отсутствия специальных средств испытаний. Гранулярность – показатель собственного шума пленочной системы, который оказывает негативное влияние при воспроизведении мелких и малоконтрастных дефектов. При проведении рентгенографического контроля особо ответственных объектов, помимо контрастных характеристик, необходимо учитывать шумовые характеристики пленочной системы.

Разработанная методика, не требующая специальных средств для проведения испытаний, доступна на любом предприятии и может оказаться полезной при проведении экспресс-испытаний на входном контроле.

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

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Оглодкова Ю.С., Оглодков М.С. Опыт и перспективы применения алюминий-литиевых сплавов в изделиях авиационной и космической техники // Металлург. 2021. № 1. С. 62–70.

2. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Кудинов И.И., Головков А.Н., Генералов А.С., Князев А.В. Оценка вероятности выявления эксплуатационных дефектов в деталях авиационной техники из жаропрочных сплавов с использованием дефектоскопических жидкостей отечественного и зарубежного производства // Дефектоскопия. 2021. № 1. С. 64–71.
3. Каблов Е.Н., Белов Е.В., Трапезников А.В., Леонов А.А., Зайцев Д.В. Особенности упрочнения и кинетика старения литейного алюминиевого высокопрочного сплава на основе системы Al–Si–Cu–Mg // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 21.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. ГОСТ Р ИСО 11699-1–2023. Контроль неразрушающий. Радиографические пленки для промышленной радиографии. Часть 1. Классификация пленочных систем для промышленной радиографии. М.: РСТ, 2023. 12 с.
5. Косарина Е.И., Степанов А.В., Демидов А.А., Крупнина О.А. Методика испытаний радиографических пленок // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2015. № 3. С. 80–89.
6. Расщупкин В.П., Корытов М.С. Дефекты металла: учеб. пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. 38 с.
7. Клюев В.В., Соснин Ф.Р. Теория и практика радиационного контроля: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1998. 170 с.
8. Кулешов В.К., Сертаков Ю.И., Ефимов П.В., Шумихин В.Ф. Практика радиографического контроля: пособие. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2009. 288 с.
9. Гнедин М.М., Шаблов С.В. Требования нормативной документации по выбору радиографической пленки // В мире неразрушающего контроля. 2019. № 1. С. 14–19.
10. Величко В.Я. Параметры качества радиографических изображений сварных соединений по новым стандартам ГОСТ ISO 17636-1,2–2017 // В мире неразрушающего контроля. 2018. № 3. С. 46–55.
11. Демидов А.А., Косарина Е.И., Коурова Н.В., Михайлова Н.А. Сенситометр для построения характеристических кривых радиографических пленок и определения чувствительности к излучению и градиента в соответствии с требованиями ISO 11699-1:2008 // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7 (89). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 12.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-81-90.
12. Макаров А.В. Химико-фотографическая обработка радиографических пленок // В мире неразрушающего контроля. 2021. № 1. С. 60–68.
13. Коваленко Т.С. Дефект типа «пригар» на литых заготовках из жаропрочных никелевых сплавов (типа ЖС32) // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 19.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
14. Леонов А.А., Трофимов Н.В., Панаев В.Г., Кудасов С.В., Широкожуков А.В. Магниево-алюминиевые сплавы в конструкции изделий навигационной системы // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 3 (76). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
15. Светлов И.Л., Петрушин Н.В., Епишин А.И., Карашаев М.М., Елютин Е.С. Монокристаллы жаропрочных никелевых сплавов, легированных рением и рутением (обзор). Часть 1 // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 1 (70). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 20.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
16. Макаров А.В. Новые документы по неразрушающему контролю в области атомной энергетики. Радиографический контроль // В мире неразрушающего контроля. 2020. № 2. С. 46–51.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V., Oglodkova Yu.S., Oglodkov M.S. Experience and prospects for the use of aluminum-lithium alloys in aviation and space technology. *Metallurg*, 2021, no. 1, pp. 62–70.
2. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Kudinov I.I., Golovkov A.N., Generalov A.S., Knyazev A.V. Assessment of the probability of detecting operational defects in aircraft parts made of heat-resistant alloys using flaw detection fluids of domestic and foreign production. *Defektoskopiya*, 2021, no. 1, pp. 64–71.

3. Kablov E.N., Belov E.V., Trapeznikov A.V., Leonov A.A., Zaitsev D.V. Strengthening features and aging kinetics of high-strength cast aluminum alloy AL4MS based on Al–Si–Cu–Mg system. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 21, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-24-34.
4. State Standard R ISO 11699-1–2023. *Non-destructive testing. Radiographic films for industrial radiography. Part 1. Classification of film systems for industrial radiography*. Moscow: RST, 2023, 12 p.
5. Kosarina E.I., Stepanov A.V., Demidov A.A., Krupnina O.A. Testing methods for radiographic films. *Vestnik MGTU im. Bauman. Ser.: Mashinostroenie*, 2015, no. 3, pp. 80–89.
6. Rashchupkin V.P., Korytov M.S. *Metal defects: textbook*. Omsk: SibADI Publ. House, 2006, 38 p.
7. Klyuev V.V., Sosnin F.R. *Theory and Practice of Radiation Monitoring: A Textbook for University Students*. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 170 p.
8. Kuleshov V.K., Sertakov Yu.I., Efimov P.V., Shumikhin V.F. *Radiographic Testing Practice: A Manual*. Tomsk: Tomsk Polytech. Univ. Publ. House, 2009, 288 p.
9. Gnedin M.M., Shablov S.V. Requirements of Regulatory Documentation for Selecting Radiographic Film. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2019, no. 1, pp. 14–19.
10. Velichko V.Ya. Quality Parameters of Radiographic Images of Welded Joints According to the New Standards GOST ISO 17636-1.2–2017. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2018, no. 3, pp. 46–55.
11. Demidov A.A., Kosarina E.I., Kourova N.V., Mikhailova N.A. Sensitometer for building characteristic curves of x-ray films and determining the sensitivity to radiation and gradient in accordance with ISO 11699-1:2008 requirements. *Trudy VIAM*, 2020, no. 6-7 (89), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 12, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-81-90.
12. Makarov A.V. Chemical and photographic processing of radiographic films. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2021, no. 1, pp. 60–68.
13. Kovalenko T.S. «Burned» type defect on cast billets of heat-resistant nickel alloys (type ZhS32). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 19, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-14-22.
14. Leonov A.A., Trofimov N.V., Panaetov V.G., Kudasov S.V., Shirokoshukov A.V. Magnesium alloys in the design of navigation system products. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 3 (76), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 15, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-25-34.
15. 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 1. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 20, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-30-50.
16. Makarov A.V. New documents on non-destructive testing in the field of nuclear energy. Radiographic testing. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2020, no. 2, pp. 46–51.

Информация об авторах

Осияненко Наталья Викторовна, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Демидов Александр Александрович, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

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

Information about the authors

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

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

Alexander A. Demidov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Статья поступила в редакцию 30.01.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.02.2025.

The article was submitted 30.01.2025; approved and accepted for publication after reviewing 17.02.2025.