

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ОБЪЕКТА КОНТРОЛЯ МЕТОДОМ РЕНТГЕНОСКОПИИ

### Применение метода рентгеноскопической толщинометрии для отливок авиационной техники

Формирование рентгеноскопического изображения можно представить по этапам (рис. 1):

– источник формирует излучение с мощностью экспозиционной дозы  $D_0$ , которое воздействует на объект, толщина которого в направлении излучения меняется от  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$  ( $\mu$  – линейный коэффициент ослабления излучения материалом объекта контроля);

– под действием излучения с дозой  $D_0$  за объектом формируется радиационное изображение, представляющее собой распределение мощности дозы излучения в зависимости от толщины  $t$  объекта:  $D = D_0 \cdot e^{-\mu t}$ ;

– преобразователь фиксирует скрытое радиационное изображение и переводит его в цифровое, доступное для анализа.

Результатом рентгеноскопического контроля является цифровое изображение. Оно представляет собой двумерную матрицу с определенным значением цвета в каждой ее точке. В данном случае результирующее цифровое рентгеноскопическое изображение имеет цветовую палитру на основе 256 оттенков серого цвета, с изменением от черного до белого. Таким образом, каждая точка изображения имеет определенный цвет в пределах этой палитры, который, в свою очередь, зависит от дозы рентгеновского излучения, попавшего на входной преобразователь рентгеноскопической системы.

На радиоскопическом изображении участки, соответствующие большей толщине объекта, выглядят темными по сравнению с участками, соответствующими малой толщине объекта.

#### Описание объектов и результаты их рентгеноскопического исследования

Для проведения практической части работы был выбран некоторый набор образцов из магния, алюминия, титана и железа. В качестве источника рентгеновского излучения использовали рентгеновский микрофокусный аппарат РАП 150М, а в качестве приемника – рентгеноскопическую установку «Норка» с флуороскопическим экраном и системой передачи изображения с экрана на монитор компьютера. Все используемые образцы представляли собой ступенчатые клинья с известными значениями толщины каждой

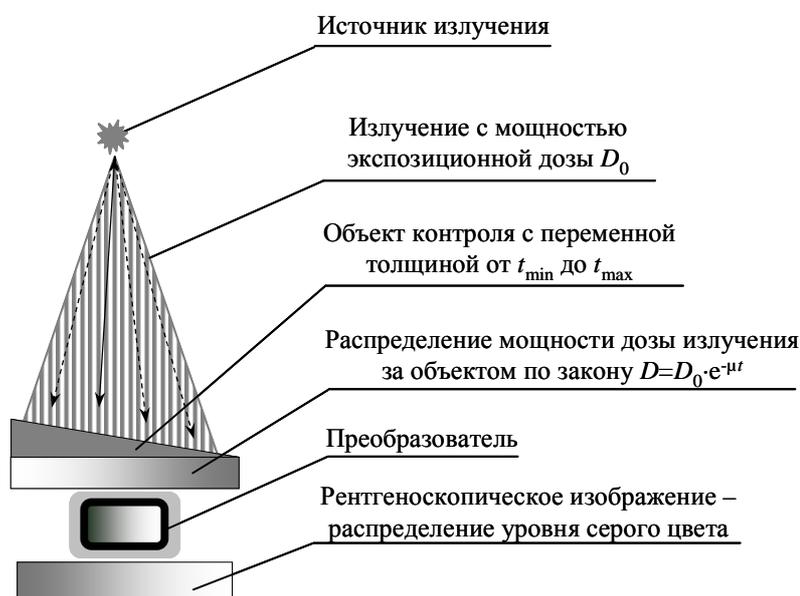


Рис. 1. Схема формирования рентгеноскопического изображения

ступени. Например, образец из сплава МЛ15 на основе магния представляет собой ступенчатый клин, состоящий из пяти и семи ступеней, в каждой ступени проделаны плоскостонные лунки цилиндрической формы различной глубины (рис. 2, табл. 1).

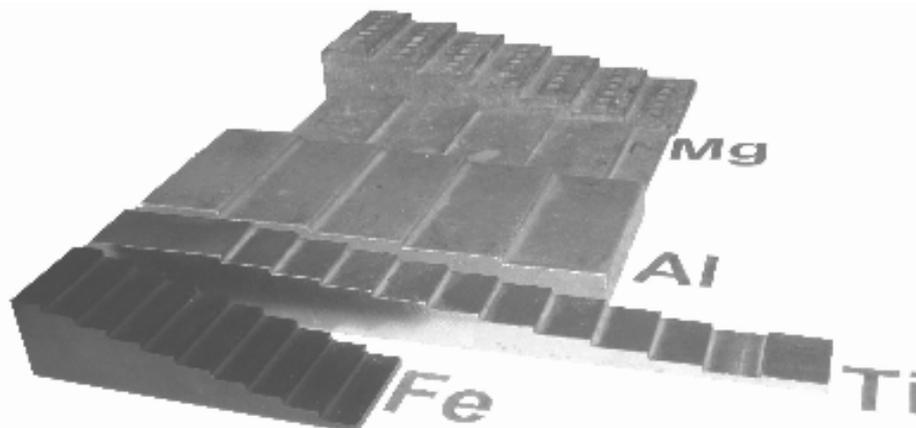


Рис. 2. Фотография ступенчатых клиньев из стали, титанового, алюминиевого, магниевых сплавов

Таблица 1

**Результаты замеров параметров образца из сплава МЛ15 на основе магния**

Ступень 0, толщина 27 мм			Ступень 1, толщина 23 мм			Ступень 2, толщина 18,7 мм			Ступень 3, толщина 14,8 мм		
Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки		Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки		Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки		Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки	
	мм	% (от толщи- ны ступени)		мм	% (от толщи- ны ступени)		мм	% (от тол- щины сту- пени)		мм	% (от тол- щины сту- пени)
1	4	14,81481481	1	3,5	15,2173913	1	4,1	21,92513369	1	2,7	18,24324324
2	2,5	9,259259259	2	2,5	10,86956522	2	2,7	14,43850267	2	2	13,51351351
3	2	7,407407407	3	2	8,695652174	3	2,2	11,76470588	3	1,5	10,13513514
4	1,2	4,444444444	4	1,2	5,217391304	4	1,5	8,021390374	4	1	6,756756757
5	1	3,703703704	5	1	4,347826087	5	1,3	6,951871658	5	0,6	4,054054054
6	–	–	6	0,6	2,608695652	6	1,1	5,882352941	6	–	–

Ступень 4, толщина 10,6 мм			Ступень 5, толщина 6,6 мм			Ступень 6, толщина 2,5 мм		
Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки		Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки		Порядко- вый номер лунки	Глубина лунки	
	мм	% (от толщины ступени)		мм	% (от толщины ступени)		мм	% (от толщи- ны ступени)
1	2,5	23,58490566	1	2	30,3030303	1	1,5	60
2	1,7	16,03773585	2	1,6	24,24242424	2	1,1	44
3	1,3	12,26415094	3	1,2	18,18181818	3	0,9	36
4	1	9,433962264	4	1	15,15151515	4	0,7	28
5	0,6	5,660377358	5	0,8	12,12121212	5	0,5	20
6	–	–	6	0,6	9,090909091	6	–	–

При просвечивании образца было получено радиоскопическое изображение (рис. 3). Специальное программное обеспечение радиоскопической установки «Норка» позволяет измерить уровень серого цвета в любой точке радиоскопического изображения или вдоль любой его линии (рис. 4). Результаты измерения приведены в табл. 2.

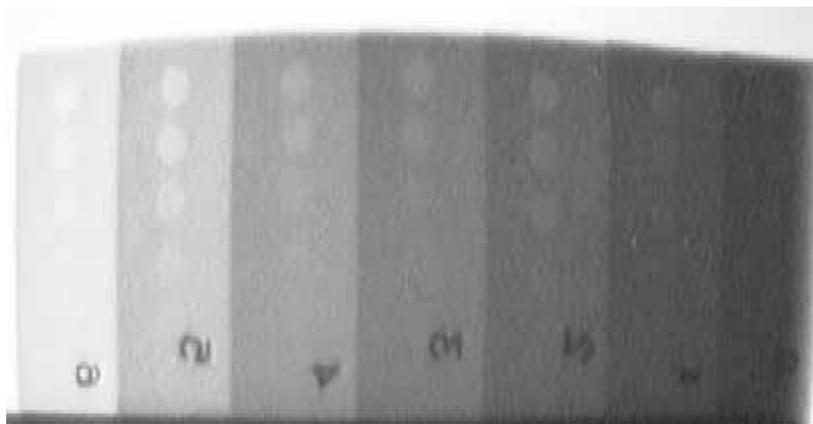


Рис. 3. Радиоскопическое изображение ступенчатого клина с лунками (образец из сплава МЛ15)

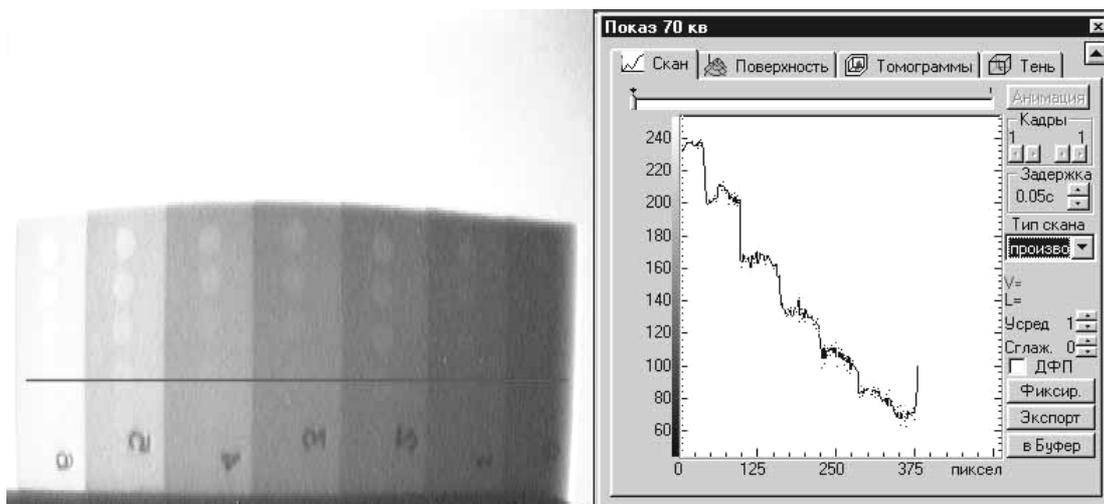


Рис. 4. Измерение уровня серого цвета в любой точке изображения (образец из сплава МЛ15)

Таблица 2

**Результаты измерения уровня серого цвета на изображении образца из сплава МЛ15**

Условный номер ступени	0	1	2	3	4	5	6
Толщина ступени, мм	27	23	18,7	14,8	10,6	6,6	2,5
Уровень серого цвета, отн. ед.*	80	98	118	149	182	220	238

\*Черному цвету соответствует 0 ед. (по шкале градации), белому – 256 ед.

Образцы из стали, сплавов на основе алюминия и титана (см. рис. 2) были исследованы аналогично образцу из сплава МЛ15. Все радиоскопические изображения были получены при оптимальных режимах.

Суть измерения толщины заключается в измерении уровня серого цвета изображения участков объекта с известными значениями толщины – больше и меньше определяемой (рис. 5).

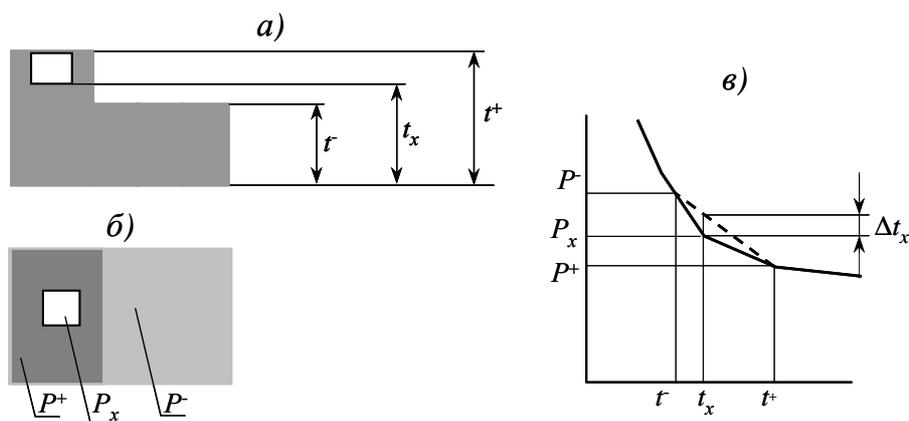


Рис. 5. Определение толщины по величине уровня серого цвета на участках радиоскопического изображения объекта:

*a* – сечение объекта; *б* – радиоскопическое изображение объекта; *в* – реальная зависимость уровня серого цвета изображения объекта от его толщины (—) и аппроксимация (---) ее линейной зависимостью (*t* и *t*<sup>+</sup> – толщина объекта в местах, доступных для измерения; *t*<sub>х</sub> – толщина объекта в месте, недоступном для измерения; *P*, *P*<sup>+</sup>, *P*<sub>х</sub> – значения уровня серого цвета, соответствующие толщине объекта в точках *t*, *t*<sup>+</sup>, *t*<sub>х</sub>;  $\Delta t_x$  – погрешность измерения толщины объекта по уровню серого цвета)

Пусть *t* и *t*<sup>+</sup> – измеренные значения толщины объекта, *t*<sub>х</sub> – толщина объекта в месте, недоступном для измерения, при этом ее значение лежит в пределах  $t < t_x < t^+$ . На радиоскопическом изображении определяем уровень серого цвета в соответствующих точках *P*<sup>+</sup>, *P*, *P*<sub>х</sub>. Используя точки [*P*<sup>+</sup>; *t*<sup>+</sup>] и [*P*; *t*], можно построить график зависимости уровня серого цвета рентгеноскопического изображения от толщины просвечиваемого материала. Далее, используя полученную зависимость  $P=f(t)$ , определяем толщину *t*<sub>х</sub>. Величина погрешности зависит от того, насколько велик диапазон измерения, и от функции аппроксимации.

### **Определение наилучшей функции аппроксимации зависимости толщины от уровня серого цвета радиоскопического изображения**

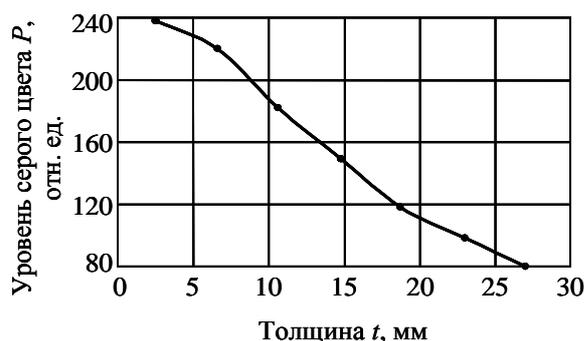
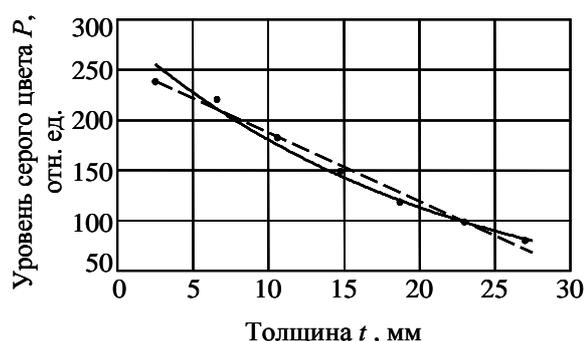
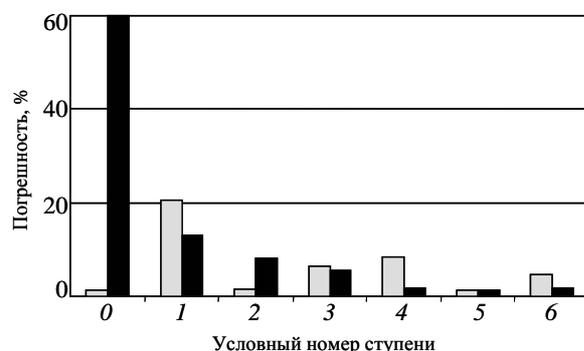
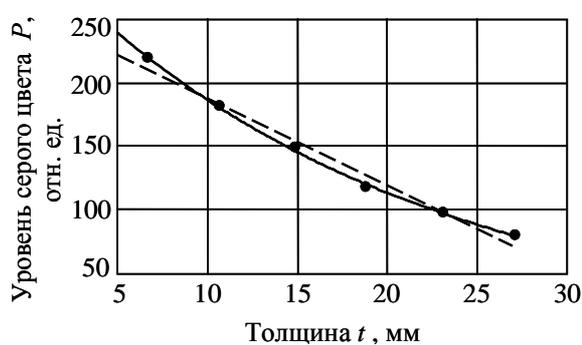
Зависимости толщины просвечиваемого объекта от уровня серого цвета на радиоскопическом изображении использованы для определения наилучшей аппроксимации. По данным табл. 2 построена зависимость  $P=f(t)$  для клина из магния (рис. 6).

Поскольку распределение дозы излучения за объектом представляет собой экспоненциальную зависимость от толщины, то наиболее точно представленная кривая должна описываться экспоненциальной функцией. Это подтверждается графиками на рис. 7, на котором сплошная кривая представляет собой экспоненциальную зависимость, пунктирная – линейную, а точки соответствуют экспериментальным данным табл. 2.

Результаты расчета погрешности – отклонение линейной и экспоненциальной кривой от истинных значений функции  $P=f(t)$  – приведены в табл. 3 и на диаграмме (см. рис. 7).

Погрешности линейной и экспоненциальной аппроксимации

Условный номер ступени	Реальная толщина ступени $t_p$	Погрешности линейной аппроксимации			Погрешности экспоненциальной аппроксимации		
		Измеренная толщина ступени $t_{и.л}$	Абсолютная погрешность измерений $\Delta$	Относительная погрешность измерений $\delta$ , %	Измеренная толщина ступени $t_{и.э}$	Абсолютная погрешность измерений $\Delta$	Относительная погрешность измерений $\delta$ , %
0	2,5	2,5	0	0	4	1,5	60
1	6,6	5,25	1,35	20,45455	5,75	0,85	12,87879
2	10,6	10,75	0,15	1,415094	9,75	0,85	8,018868
3	14,8	15,75	0,95	6,418919	14	0,8	5,405405
4	18,7	20,25	1,55	8,28877	19	0,3	1,604278
5	23	23	0	0	23	0	0
6	27	25,75	1,25	4,62963	27,5	0,5	1,851852

Рис. 6. Зависимость  $P=f(t)$  для клина из сплава МЛ5Рис. 7. Аппроксимация экспериментальной зависимости ( $\bullet$ ) линейной (---) и экспоненциальной (—) зависимостью  $P=f(t)$ Рис. 8. Погрешности линейной ( $\square$ ) и экспоненциальной ( $\blacksquare$ ) аппроксимации функции  $P=f(t)$ Рис. 9. Линейная (---) и экспоненциальная аппроксимация (—) функции  $P=f(t)$  в диапазоне толщины объекта от 6,6 до 27 мм

Анализ диаграммы показывает (рис. 8), что максимальное значение относительной погрешности соответствует наименьшей толщине исследуемого объекта. Минимальная толщина объекта на мониторе радиоскопической установки воспроизводится уровнем серого цвета, равным 238 ед., в то время как предельное значение уровня цвета (белый) радиоскопического изображения составляет 256 ед. Зоны с большой и малой толщиной объекта контроля, воспроизводимые радиоскопической установкой уровнем серого цвета в диапазонах  $0 \div 80$  и  $170 \div 256$ , соответствуют участкам световой характеристики монитора, описываемым кривой малой крутизны, а потому – с максимальной погрешностью измерений. Уберем из рассмотрения точку, соответствующую толщине 2,5 мм и самой высокой погрешности, и сузим диапазон толщин от 6,6 до 27 мм, для которого построим снова линейную и экспоненциальную аппроксимацию (рис. 9).

Расчет погрешностей уменьшенного диапазона (табл. 4) и анализ диаграмм показывает (рис. 10), что экспоненциальная аппроксимация приводит к значительно меньшей погрешности ( $\delta_{\max} \approx 2,5\%$ ), чем линейная ( $\delta_{\max} > 20\%$ ), – следовательно, она более точно описывает зависимость  $P=f(t)$ .

Таблица 4

**Погрешности линейной и экспоненциальной аппроксимации для суженного диапазона толщин**

Условный номер ступени	Реальная толщина ступени $t_p$	Погрешности линейной аппроксимации			Погрешности экспоненциальной аппроксимации		
		Измеренная толщина ступени $t_{и.л}$	Абсолютная погрешность измерений $\Delta$	Относительная погрешность измерений $\delta$ , %	Измеренная толщина ступени $t_{и.э}$	Абсолютная погрешность измерений $\Delta$	Относительная погрешность измерений $\delta$ , %
		мм			мм		
0	2,5	–	0	0	–	0	0
1	6,6	5,25	1,35	20,45455	6,75	0,15	2,2727273
2	10,6	10,5	0,1	0,943396	10,5	0,1	0,9433962
3	14,8	15,5	0,7	4,72973	14,5	0,3	2,027027
4	18,7	19,75	1,05	5,614973	19	0,3	1,6042781
5	23	23	0	0	23	0	0
6	27	25,5	1,5	5,555556	27	0	0

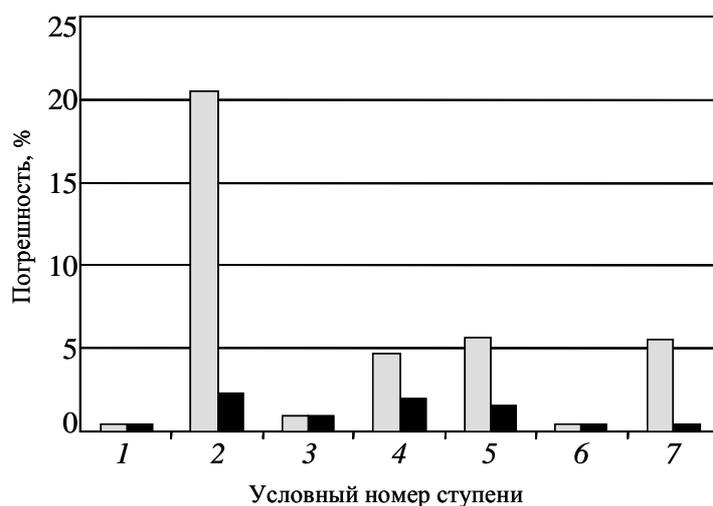


Рис. 10. Погрешности линейной (□) и экспоненциальной аппроксимации (■) функции  $P=f(t)$  для уменьшенного диапазона толщин

Анализ диаграмм показывает (см. рис. 10), что линейная аппроксимация зависимости  $P=f(t)$  возможна без потери в точности только при небольших диапазонах измеряемых толщин, что подтверждается экспериментом и расчетом. Из сравнения погрешностей линейной и экспоненциальной аппроксимации для диапазонов  $6,6 \div 14,8$ ;  $10,6 \div 18,7$ ;  $14,8 \div 23$  и  $18,7 \div 27$  мм видно, что различия между линейной и экспоненциальной аппроксимацией пренебрежимо малы. В этом случае допустимо использование линейного представления зависимости  $P=f(t)$ .

### Наименьшее количество точек, необходимое для построения функции $P=f(t)$ и определения погрешности измерения толщины

Процесс измерения толщины с помощью рентгеноскопической установки заключается в измерении уровня серого цвета, соответствующего известным значениям толщины в крайних точках измеряемого диапазона (см. рис. 5). Для того чтобы измерение было проведено с минимальной погрешностью, необходима достаточно достоверная зависимость  $P=f(t)$ . Ее строят экспериментально по измеряемым точкам, следовательно, она будет тем точнее, чем больше точек участвуют в ее построении. Чтобы процесс не был трудоемким, необходимо определить минимальное количество точек, по которым

можно построить и в дальнейшем использовать зависимость  $P=f(t)$  с удовлетворительной погрешностью. С этой целью был проведен анализ погрешностей при экспоненциальной аппроксимации  $P=f(t)$  с различным числом точек построения зависимости  $P=f(t)$ . Его результаты показаны на диаграмме (рис. 11), на которой видно, что для построения кривой  $P=f(t)$  достаточно трех точек, причем наименьшая погрешность получается, когда измеряемая толщина находится в центре участка кривой, построенной по трем точкам.

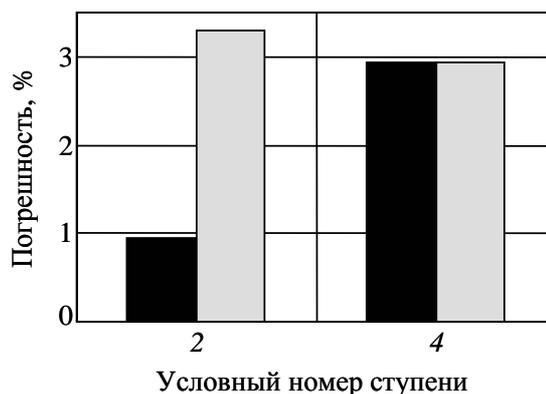


Рис. 11. Погрешности измерения толщины второй и четвертой ступеней по зависимости  $P=f(t)$ , построенной по трем точкам (■) и по двум точкам (■)

### Основной недостаток метода радиоскопического измерения толщины

Процесс измерения толщины объекта контроля радиоскопическим методом имеет ограничение. Нестабильность доз излучения, формирующих радиационное изображение, приводит к тому, что значения уровня серого цвета для одной и той же толщины от опыта к опыту будут меняться. Поэтому нужно делать нормировку уровня серого цвета для каждого опыта отдельно. Различие в рентгеновских аппаратах, преобразователях и режимах работы делают процедуру рентгеноскопического измерения толщины сильно привязанной к конкретным условиям контроля и не позволяют применять некоторую универсальную зависимость. Более того, построение такой зависимости даже для одного и того же объекта контроля при использовании одной и той же радиоскопической системы контроля (рентгеновский аппарат и преобразователь) также затруднительно. На рис. 12 показаны зависимости  $P=f(t)$ , построенные на одной и той же рентгеноскопической системе «Норка», для ступенчатого магниевого клина (см. табл. 1) при трехкратном просвечивании (режим: анодное напряжение 80 кВ и анодный ток 80 мкА) – каждый раз с включением и выключением аппарата и настройкой режима контроля заново. Разброс уровня серого цвета составляет 10–20 единиц.



Рис. 12. Построение функции  $P=f(t)$  для одного и того же объекта после двух коммутаций рентгеноскопической системы: — — первое измерение; — второе; - - - третье

Таким образом, в результате работы были сделаны следующие выводы.

- При измерении толщины участка объекта следует выбирать диапазон таким образом, чтобы значение уровня серого цвета на границе диапазона не выходило за пределы 80÷230.
- В широком диапазоне толщин, когда изменение толщины составляет более 40% от средней толщины в рассматриваемом диапазоне, возможно использовать только экспо-

ненициальную аппроксимацию зависимости  $P=f(t)$ . Относительная погрешность будет находиться в пределах 10%.

– Если же в рассматриваемом диапазоне изменение толщины меньше 40% от средней толщины, то возможно использование как линейной, так и экспоненциальной аппроксимации зависимости  $P=f(t)$ .

– При измерении толщины объекта необходимо иметь образцы толщиной больше и меньше толщины исследуемого объекта.

*К.Г. Мирошин, Е.И. Косарина*

## **МИКРОРАДИОГРАФИЧЕСКИЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Работа многих современных агрегатов, деталей и машин происходит 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 работы ужесточаются. Особенно это заметно для такой быстро развивающейся отрасли в мире, как авиация, где подчас требуется проведение 100%-ного контроля деталей в партии, что может обеспечить только неразрушающий контроль (НК). Одним из основных видов НК, широко применяемым 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 выше плотность материала, чем толще слой поглотителя, тем выше степень ослабления рентгеновского излучения. Теневая картина представляет собой распределение экспозиционной дозы или мощности дозы рентгеновского излучения. Поэтому в местах наличия дефектов в объекте контроля (ОК), т. е. в местах нарушения целостности, рентгеновское излучение иначе поглощается – по сравнению с бездефектными участками ОК. Распределение экспозиционной дозы излучения или мощности экспозиционной дозы за ОК называют радиационным изображением, мерой полезной информации которого является радиационный контраст  $K_{\text{рад}}$  (относительная разница мощности дозы или дозы излучения между участками, соответствующими дефектному и бездефектному местам ОК). Далее радиационное изображение преобразуется в оптическое с контрастом  $K_{\text{опт}}$ , посредством радиографической пленки или другого преобразователя. Соотношение между оптическим и радиационным контрастами изображений определяется градиентом преобразования  $\gamma$ :

$$K_{\text{опт}} = \gamma \cdot K_{\text{рад}},$$

где  $\gamma=3-4$  – для рентгенографического метода;  $\gamma=1$  – для радиоскопического метода при непосредственном наблюдении изображения;  $\gamma>1$  – для радиоскопического метода при использовании телевизионной системы [1].

Рентгенографический метод НК – метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. Основным преобразователем излучения при рентгеновском методе контроля является радиографическая пленка.

Радиоскопический метод НК – метод неразрушающего контроля, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта с помощью флуоресцирующего экрана, сцинтилляционного монокристалла или электронно-оптического преобразователя.