

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА

Р.А. Назипов, А.С. Храмов, Л.Д. Зарипова

**Основы радиационного
неразрушающего контроля**
(Методическое пособие)

КАЗАНЬ
2008

УДК 539.1.06

ББК 34.5-7

Н 52

Рекомендовано в печать Ученым Советом физического факультета
Казанского государственного университета

Рецензент:

к.ф.-м.н, доцент, зав. лабораторией изотопных методов КИБ КНЦ
РАН Манапов Р.А.

Назипов Р.А., Храмов А.С., Зарипова Л.Д.

Н 52 Основы радиационного неразрушающего контроля. Учебно-методическое пособие для студентов физического факультета.

Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008.-66 с.: ил.

Изложены физико-технические основы рентгеновского и гамма неразрушающего контроля. Даны общие сведения о дефектоскопии и неразрушающем контроле. Приведены краткие сведения о аппаратуре для радиографического контроля. Рассмотрены основные принципы радиографического контроля.

Методическое пособие предназначено для студентов физического факультета при изучении курса «Неразрушающий контроль и дефектоскопия».

Рис. 28, табл. 17, библиогр. 10 наим.

УДК 539.1.06

ББК 34.5-7

© Назипов Р.А., Храмов А.С.,
Зарипова Л.Д. 2008

© Казанский государственный
университет, 2008

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕФЕКТΟΣКОПИИ.....	4
1.1. Необходимые определения.....	4
1.2. Общая характеристика средств неразрушающего контроля..	6
1.3. Характеристика и классификация дефектов.....	9
1.4. Классификация дефектов сварки.....	10
1.5. Радиационный неразрушающий контроль.....	14
2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	18
2.1. Механизмы возникновения рентгеновского и гамма- излучений.....	18
2.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом	25
2.3. Основные единицы измерений ионизирующих излучений...28	
3. АППАРАТУРА ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ.29	
3.1. Рентгеновские аппараты.....	29
3.2. Рентгеновские трубки.....	33
3.3. Гамма-дефектоскопы.....	38
4. ВЫЯВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЯ.....	40
4.1. Радиографическая пленка как детектор.....	40
4.2. Выбор параметров радиографического контроля.....	43
4.3. Схемы просвечивания.....	60
4.4. Обработка пленок.....	61
4.5. Расшифровка дефектограмм.....	63
5. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТΟΣКОПАМИ.....	64
ЛИТЕРАТУРА.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Одной из самых важных проблем современного общества является обеспечение безопасности человеческого существования и деятельности. Наиболее остро проблема безопасности ощущается в технической сфере, в различных отраслях производства и строительства. Поэтому важно попытаться прогнозировать возможные аварии и катастрофы. Одним из основных методов прогноза является экспертиза промышленной безопасности. Очевидно, что без применения средств технической диагностики (ТД) и неразрушающего контроля (НК) невозможно правильно и надежно установить степень опасности и пределы сроков эксплуатации промышленных объектов.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

1.1. Необходимые определения

Техническая диагностика (ТД) – это область знаний, охватывающая теорию, методы и средства определения технического состояния объектов.

Технический контроль (ТК) – это проверка соответствия *объекта контроля (ОК)* установленным техническим требованиям. Как правило, он состоит из двух этапов: получения первичной информации о состоянии ОК и сопоставления ее с установленными нормами.

Неразрушающий контроль (НК) является составной частью технического контроля и определяется как метод, при котором не должна быть нарушена пригодность ОК к применению.

В задачу НК входит выявление возможных отклонений от установленных технических характеристик ОК. Такими отклонениями могут быть: дефекты типа нарушений сплошности, изменение структуры и физических свойств материала, размеров покрытий, соединений и т.п. Конечным результатом НК является регистрация всех обнаруженных отклонений и, по возможности, количественная оценка их

параметров (координат, размеров и формы дефектов, величин, зависящих от физических характеристик материала). Отбраковка негодных изделий проводится на основе заранее установленных норм.

Дефектоскопия – направление НК по определению дефектов в основном типа нарушения сплошности материала с помощью проникающих физических полей и химических веществ.

Интроскопия – направление НК и ТД, связанное с визуализацией физических полей, прошедших или отраженных от ОК, для определения дефектов материала и состояния конструкций.

Измерение – нахождение физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Испытание – экспериментальное определение количественных и качественных характеристик продукции в результате воздействия на нее при ее функционировании.

ТД является высшим уровнем ТК и дает ответ на главные вопросы: когда должна быть прекращена эксплуатация изделия, и что необходимо сделать для ее продления? При проведении ТД в качестве основного средства получения информации о состоянии ОК служит ТК, основанный на результатах измерений и испытаний. Разница между ТД и ТК состоит в следующем:

- ТК применяется в основном для измерения параметров материалов, деталей и узлов конструкций, тогда как объектами ТД являются более сложные агрегаты и механизмы, для которых необходимо определять остаточный ресурс и риск эксплуатации;
- при проведении ТК характер и размеры допустимых дефектов регламентированы заранее установленными нормами, а при ТД результаты анализируются с учетом влияния дефектов на работоспособность ОК в соответствии с конкретными методиками, программами и стандартами по расчету остаточного ресурса и риска эксплуатации на основании данных ТК.

Радиационный неразрушающий контроль (РНК) основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после

взаимодействия его с ОК. Наиболее широко используют для контроля жесткое электромагнитное излучение.

1.2. Общая характеристика средств неразрушающего контроля

К средствам неразрушающего контроля (СНК) относят контрольно-измерительную аппаратуру, в которой используют проникающие поля, излучения и вещества для получения информации о качестве исследуемых материалов и объектов. Официально НК подразделяют на девять видов: магнитный, электрический, вихре-токовый, радиоволновый, тепловой, оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами. Каждый вид НК осуществляют методами, которые классифицируют по следующим признакам:

- характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- первичным информативным параметрам;
- способам получения первичной информации.

По техническому исполнению средства контроля можно подразделить на три класса:

- автономные приборы для контроля одной или нескольких взаимосвязанных качественных характеристик;
- комплексные системы, автоматические линии и роботы-контролеры, предназначенные для определения ряда основных параметров, характеризующих качество объекта;
- системы НК для автоматического управления технологическими процессами по качественным признакам.

По видам контролируемых параметров СНК разделяют на приборы:

- дефектоскопы — для обнаружения дефектов типа нарушений сплошности (трещин, раковин, расслоений и др.);
- толщиномеры — для контроля геометрических характеристик (наружные и внутренние диаметры, толщина стенки, покрытий, степень износа, ширина и длина изделия и др.);

- структуроскопы — для измерения физических и физико-химических характеристик (электрических, магнитных и структурных параметров, отклонений от заданного химического состава, измерения твердости, пластичности, коэрцитивной силы, контроля качества упрочненных слоев, содержания и распределения ферритной фазы и др.);
- приборы технической диагностики - для предсказания возникновения различного рода дефектов, в том числе нарушений сплошности, изменения размеров и механических свойств изделий за период эксплуатации изделий.

Выбор метода и прибора для решения задач дефектоскопии, толщинометрии, структуроскопии и технической диагностики зависит от параметров контролируемого объекта и условий его обследования. Ни один из методов и приборов не является универсальным и не может удовлетворить в полном объеме требованиям практики.

Вид проводимого контроля может зависеть от вида технологического процесса. При контроле для каждого дефекта независимо от его вида или типа может быть определен конкретный характеристический размер. При радиографии и электромагнитных методах контроля характеристическим размером является отношение глубины дефекта к толщине металла; при ультразвуковом контроле — эквивалентная площадь дефекта или условный коэффициент выявляемости дефекта.

При выборе метода или комплекса методов для дефектоскопического контроля деталей и узлов необходимо наряду со специфическими особенностями и техническими возможностями каждого метода учитывать следующие факторы: характер (вид) дефекта и его расположение, условия работы деталей и технические условия на отбраковку, материал детали, состояние и чистоту обработки поверхности, форму и размер детали, зоны контроля, доступность детали и зоны контроля, условия контроля.

Чувствительность метода определяется наименьшими размерами выявляемых дефектов: для поверхностных дефектов —

шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяженностью в глубь металла и по поверхности детали; для глубинных дефектов — размерами дефекта и глубиной залегания. Чувствительность зависит от особенностей метода контроля, технических данных аппаратуры, чистоты обработки поверхности контролируемой детали, ее материала, условий контроля и других факторов. При радиографическом методе чувствительность определяют по изображению на снимке проволочного, канавочного или пластинчатого эталона. Чувствительность некоторых методов неразрушающего контроля приведена в табл. 1.

Таблица 1

Чувствительность методов неразрушающего контроля

Метод	Минимальные размеры обнаруживаемых поверхностных трещин ¹ , мм		
	ширина раскрытия	глубина	протяженность
Визуально-оптический	0,005-0,01	-	0,1
Люминесцентно-красочный	0,001-0,002	0,01-0,03	0,1-0,3
Цветной	0,001-0,002	0,01-0,03	0,1-0,3
Люминесцентно-порошковый	0,01-0,03	0,1-0,3	2-3
Магнитнопорошковый	0,001	0,01 – 0,05	0,3
Электроиндуктивный	0,0005-0,001	0,15-0,2	0,6-2
Ультразвуковой импульсный	0,001-0,03	0,1-0,3	-
Рентгенографический	-	0,1-0,3 1,5-3 % (от толщины детали)	-
Гамма-графический	-	4-6 % (от толщины детали)	-

1 Нижняя граница интервала минимальных размеров относится к контролю деталей и образцов в оптимальных лабораторных условиях.

Пределная чувствительность дефектоскопа характеризуется минимальным размером дефекта, который еще может быть обнаружен с заданной вероятностью в данном изделии при данной настройке аппаратуры. Каждому варианту контроля может соответствовать своя пределная чувствительность для одного и того же изделия. При одной и той же настройке аппаратуры при контроле разных изделий, например, из различных материалов, прибор имеет разные значения пределной чувствительности.

1.3. Характеристика и классификация дефектов

В соответствии с ГОСТами [1-4] дефекты разделяют на явные и скрытые, а также критические, значительные и малозначительные. Такое разделение дефектов проводят для последующего выбора вида контроля качества продукции (выборочный или сплошной). При любом методе контроля о дефектах судят по косвенным признакам (характеристикам), свойственным данному методу. Некоторые из этих признаков поддаются измерению. Результаты измерения характеризуют выявленные дефекты и используются для их классификации.

Дефекты типа нарушений сплошности металла являются следствием несовершенства его структуры и возникают на разных стадиях технологического процесса. К дефектам тонкой структуры относят дислокации — особые зоны искажений атомной решетки. Прочность деталей резко падает при определенном числе дислокаций в единице объема кристалла. Субмикроскопические трещины (размером порядка нескольких микрометров) образуются в процессе обработки детали (например, шлифования) и резко снижают ее прочность, особенно при работе в условиях напряженного состояния или воздействия поверхностно-активных сред. Если поврежденный поверхностный слой удалить, например, путем электролитического травления, то прочность детали существенно повышается. Наиболее грубыми дефектами являются макроскопические, в ряде случаев видимые невооруженным глазом, представляющие собой нарушения сплошности или однородности металла,

особенно резко снижающие прочность детали. Эти дефекты образуются в металле вследствие несовершенства технологического процесса и низкой технологичности многокомпонентных сплавов, при обработке которых требуется особенно точно соблюдать режимы технологического процесса на каждом этапе.

Встречающиеся в металлических изделиях и полуфабрикатах дефекты различают по размерам и расположению, а также по природе их происхождения. Они могут образоваться в процессе плавки и литья (раковины, поры, зоны рыхлоты, включения, ликвационные зоны, горячие трещины); обработки давлением (внутренние и поверхностные трещины, расслоения, пресс-утяжины, рванины, заковы, закаты, плены, флокены); термической и химико-термической обработки (зоны грубозернистой структуры, перегрева и пережога, термические трещины, несоответствие заданному значению толщины закаленного, цементированного, азотированного и других слоев, а также толщины слоя гальванического покрытия); механической обработки (шлифовочные трещины, прожоги); сварки, пайки, склеивания (непровар, трещины, непропай, непроклей); хранения и эксплуатации (коррозионные поражения, усталостные трещины, трещины термической усталости, ползучести). Для указанных дефектов характерен один общий признак: они вызывают изменение таких физических характеристик материала, как удельная электрическая проводимость, магнитная проницаемость, коэффициент затухания упругих колебаний, плотность, коэффициент ослабления излучений и др.

1.4. Классификация дефектов сварки

Основным технологическим процессом изготовления конструкций и оборудования является сварка. Важное место в технологическом процессе изготовления изделий занимают методы их НК, позволяющие исключить поступление в эксплуатацию изделий с недопустимыми дефектами. Объем контрольных операций составляет 10-12 % объема работ по изготовлению изделий.

В процессе образования сварного соединения в зоне шва и зоне термического влияния могут возникать дефекты, приводящие к снижению прочности, эксплуатационной надежности, точности линейных размеров, а также ухудшению внешнего вида изделия. Дефекты сварных соединений (рис. 1) различают по причинам возникновения и месту их расположения.

В зависимости от причин возникновения их можно разделить на две группы. К первой группе относятся дефекты, связанные с металлургическими и тепловыми явлениями, происходящими в процессе образования, формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания сварного соединения: горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, поры, шлаковые включения, неблагоприятные изменения свойств металла шва и зоны термического влияния.

Ко второй группе дефектов, которые называют дефектами формирования швов, относят дефекты, происхождение которых связано в основном с нарушением режима сварки, неправильной подготовкой и сборкой элементов конструкции под сварку, неисправностью оборудования, небрежностью и низкой квалификацией сварщика и другими нарушениями технологического процесса. К дефектам этой группы относятся: несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, незаваренные кратеры и др.

Дефекты подразделяются на *внешние* и *внутренние*. К внешним относятся: нарушение установленных размеров и формы шва, непровар, подрез зоны сплавления, поверхностное окисление, прожог, наплыв, поверхностные поры, незаваренные кратеры и трещи-

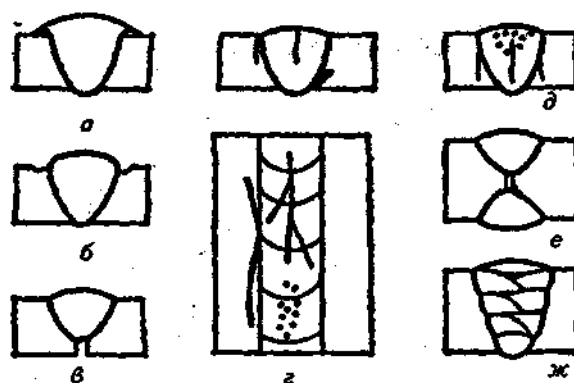


Рис. 1. Виды дефектов в сварных соединениях: а — наплыв; б — подрез; в — непровар; г — наружные трещины и поры; д — внутренние трещины и поры; е — внутренний непровар; ж — шлаковые включения

ны на поверхности шва. К внутренним дефектам относят: внутренние поры, неметаллические включения, непровар и внутренние трещины.

Нарушение установленных размеров и формы шва выражается в неполномерности ширины и высоты шва, в чрезмерном усилении (возвышении) шва и резких переходах от основного металла к наплавленному. Эти дефекты при ручной сварке являются результатом низкой квалификации сварщика, плохой подготовки свариваемых кромок, неправильного выбора сварочного тока, низкого качества сборки под сварку. Дефекты формы шва могут быть и следствием колебания напряжения в сети. При автоматической сварке нарушения формы и размеров шва являются следствием неправильной разделки шва или нарушения режима в процессе сварки – скорости сварки, скорости подачи электродной проволоки, сварочного тока.

Непровар (местное несплавление свариваемых кромок основного и наплавленного металла) — следствие низкой квалификации сварщика, некачественной подготовки свариваемых кромок (малый угол скоса, отсутствие зазора, большое притупление), смещения электрода к одной из кромок, быстрого перемещения электрода по шву.

Подрез зоны (узкие углубления в основном металле вдоль края сварного шва) образуется при сварке большим током или удлиненной дугой, при завышенной мощности горелки, неправильном положении электрода или горелки и присадочного прутка.

Поверхностное окисление — окисление металла шва и прилегающего к нему основного металла. Причины: сильно окисляющая среда, большая длина дуги, чрезмерно большая мощность сварочной горелки или слишком большой сварочный ток, замедленное перемещение электрода или горелки вдоль шва.

Прожоги — сквозное отверстие в сварном шве. Основные причины прожога: большой сварочный ток, завышенная мощность сварочной горелки, малая толщина основного металла, малое притуп-

ление свариваемых кромок и неравномерный зазор между ними по длине.

Наплывы — результат натекаания наплавленного металла на непрогретую поверхность основного металла или ранее выполненного валика без сплавления с ним. Такие дефекты могут быть при низкой квалификации сварщика, недоброкачественных электродах и несоответствии скорости сварки и сварочного тока разделке шва.

Поверхностные и внутренние поры возникают вследствие попадания в металл шва газов (водород, азот, углекислый газ и др.), образовавшихся при сварке. Водород образуется из влаги, масла и компонентов покрытия электродов. Азот в металл шва попадает из атмосферного воздуха при недостаточно качественной защите расплавленного металла шва. Оксид углерода образуется в процессе сварки стали при выгорании углерода, содержащегося в металле. Если свариваемая сталь и электроды имеют повышенное содержание углерода, то при недостатке в сварочной ванне раскислителей и при большой скорости сварки оксид углерода не успевает выделиться и остается в металле шва. Таким образом, пористость является результатом плохой подготовки свариваемых кромок (загрязненность, ржавчина, замасленность), применения электродов с сырым покрытием, влажного флюса, недостатка раскислителей, больших скоростей сварки.

Неметаллические включения образуются при сварке малым сварочным током, при применении недоброкачественных электродов, сварочной проволоки, флюса, загрязненных кромок и плохой очистке шва от шлака при многослойной сварке. При неправильно выбранном режиме сварки шлаки и оксиды не успевают всплыть на поверхность и остаются в металле шва в виде неметаллических включений.

Трещины (наружные и внутренние) - являются опасными и недопустимыми дефектами сварных швов. Они образуются вследствие напряжений, возникающих в металле от его неравномерного нагрева, охлаждения и усадки. Высокоуглеродистые и легированные стали после сварки при охлаждении закаляются, в результа-

те чего могут образоваться трещины. Причина возникновения трещин — повышенное содержание в стали вредных примесей (серы и фосфора).

1.5. Радиационный неразрушающий контроль

Радиографический контроль применяют для выявления в сварных соединениях трещин, непроваров, пор, шлаковых, вольфрамовых, окисных и других включений [4]. Радиографический контроль применяют также для выявления прожогов, подрезов, оценки величины выпуклости и вогнутости корня шва, недоступных для внешнего осмотра.

При радиографическом контроле не выявляют:

- несплошности и включения с размером в направлении просвечивания менее удвоенной чувствительности контроля;
- непровары и трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением просвечивания и (или) величина раскрытия менее значений, приведенных в табл. 2;
- несплошности и включения, если их изображения на снимках совпадают с изображениями посторонних деталей, острых углов или резких перепадов трещин просвечиваемого металла.

Таблица 2

Радиационная толщина ¹ , мм	Раскрытие непровара (трещины), мм
До 40	0,1
Свыше 40 до 100 включительно	0,2
100 - 150	0,3
150 - 200	0,4
Свыше 200	0,5

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента (рис. 2):

¹ Суммарная длина участков оси рабочего пучка направленного первичного ионизирующего излучения в материале контролируемого объекта.

- источник ионизирующего излучения;
- контролируемый объект;
- детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

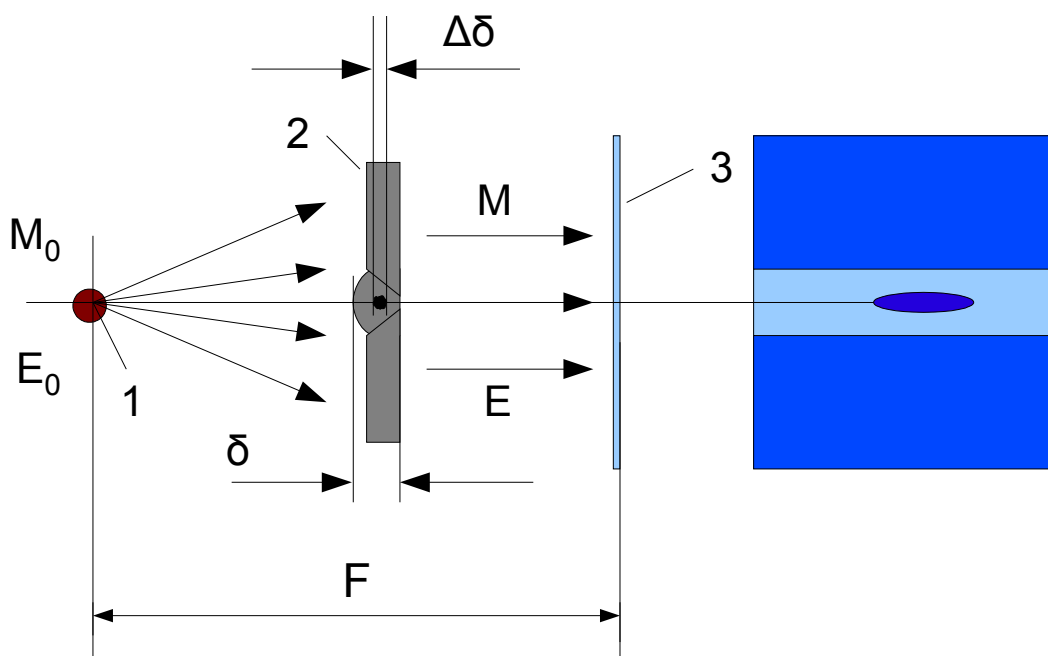


Рис. 2. Схема просвечивания: 1 — источник; 2 — изделие; 3 — детектор

При прохождении через изделие ионизирующее излучение поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины δ и плотности ρ контролируемого объекта, а также интенсивности M и энергии E излучения. При наличии в веществе внутренних дефектов размером $\Delta\delta$ изменяются интенсивность и энергия пучка излучения. На рис. 2 видно, что засветка детектора (более темный участок) происходит больше в том месте, куда попало больше квантов ионизирующего излучения (в месте дефекта).

Изделия просвечивают с использованием различных видов ионизирующих излучений, классификация которых приведена на рис. 3. В настоящем пособии опускается рассмотрение нейтронной радиографии, поскольку в широкой практике промышленного контроля ее применение ограничено.



Рис. 3. Классификация источников ионизирующих излучений

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации (рис.4) и соответственно делятся на радиографические, радиоскопические и радиометрические.

Радиографические методы РНК основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документарным подтверждением получаемых результатов. В зависимости от используемых детекторов различают пленочную радиографию и ксерорадиографию (электрорадиографию). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором видимого изображения служит фотопленка, во вто-

ром — полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

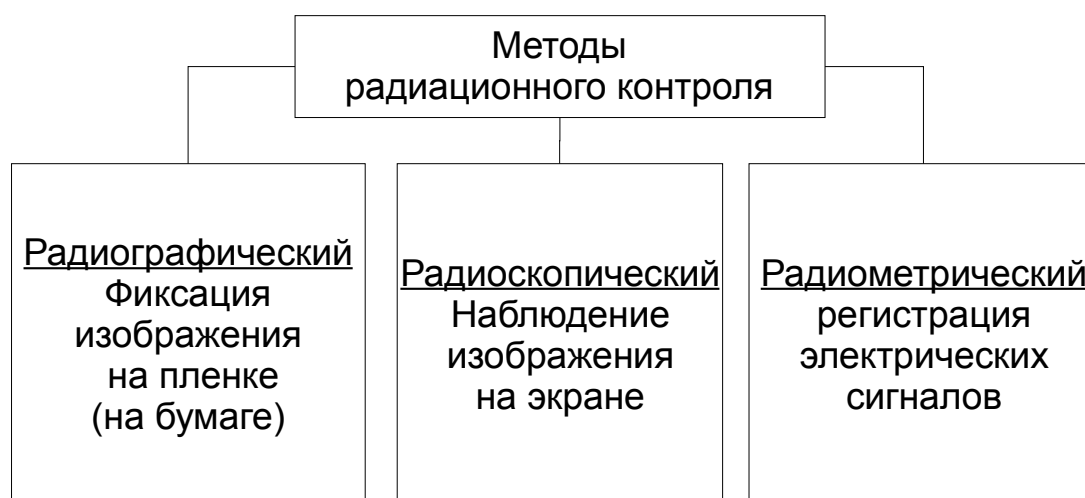


Рис. 4. Классификация методов радиационного контроля

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, ускорительную и нейтронную радиографии. Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

Радиационная интроскопия — метод РНК, основанный на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя, причем анализ полученного изображения проводится в процессе контроля.

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются повышенная достоверность получаемых результатов благодаря возможности стереоскопического изображения дефектов и рассмотрения изделий под разными углами, экспрессность и непрерывность контроля.

Радиометрическая дефектоскопия — метод получения информации о внутреннем состоянии контролируемого изделия, просвечиваемого ионизирующим излучением, в виде электрических сигналов (различной величины, длительности или количества).

Этот метод обеспечивает наибольшие возможности автоматизации процесса контроля и осуществления автоматической обратной связи контроля и технологического процесса изготовления изделия. Преимуществом метода является возможность проведения непрерывного высокопроизводительного контроля качества изделия, обусловленная высоким быстродействием аппаратуры. По чувствительности этот метод не уступает радиографии.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2.1. Механизмы возникновения рентгеновского и гамма-излучений

Основными направлениями радиационной дефектоскопии являются рентгено- и гамма-дефектоскопия. Различие между рентгеновской и гамма-дефектоскопией заключается в используемых источниках ионизирующих излучений, однако ввиду общности способов регистрации излучения и целей испытаний они имеют общую методику и технологию проведения контроля в производственных условиях.

Рентгеновские и гамма-лучи (γ -лучи) обладают, той же самой природой, что и видимый свет (электромагнитное излучение). Диапазон длин волн жесткого электромагнитного излучения приведен в табл. 3.

Таблица 3

Диапазон энергий и длин волн рентгеновского и гамма излучения

Диапазон энергий (кэВ)	Диапазон длин волн	Название
0,11 - 100	от 0,01 до 12 нм	Рентгеновское излучение
10 - 5000	от 0,0002 до 0,12 нм	Гамма-излучение

О терминологии жесткого электромагнитного излучения. Считается, что фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц, называется *гамма-излучением*. *Рентгеновским излучением* называется тормозное или характеристическое излучение атомов. Тормозное излучение больших энергий или фотонное излучение высокоэнергетических заряженных частиц при изменении направления движения, также иногда называют *синхротронным излучением*.

Рентгеновское и гамма-излучение являются ионизирующим излучением, то есть оно способно при прохождении через вещество выбить из атомов электроны. При этом образуются положительно заряженные ионы и электроны. Кроме того, высокоэнергетическое ионизирующее излучение обладает большой проникающей способностью, поэтому оно нашло широкое применение в неразрушающем исследовании живых и неживых объектов.

Энергия кванта связана с длиной волны λ (частотой ν) электромагнитного излучения

$$E_{\gamma} = h \cdot \frac{c}{\lambda} = h \nu , \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света в вакууме.

Электромагнитное излучение возникает, когда частицы в результате какого-то изменения теряют энергию. Это может произойти при торможении, изменении направления движения или переходе на более низкий энергетический уровень в электронной оболочке атома.

Элементарные процессы, которые могут приводить к испусканию фотонного излучения, можно разделить на три группы.

1. *Ускоренное движение заряженных частиц*. К этой группе относятся процессы излучения при торможении заряженных частиц в веществе (рис. 5) или при излучении частиц, движущихся по круговой траектории (рис. 6), например, при движении заряда в однородном магнитном поле. Заряженная частица (например, электрон) изменяет траекторию движения под воздействием электрического поля атома (рис. 5). В результате полученного ускоре-

ния она испускает фотон. Это явление носит название тормозного излучения.

Мощность излучения P , т.е. энергия, излучаемая в единицу времени по всем направлениям, для заряженной частицы, которая движется с ускорением, равна:

$$P_t = \alpha q^2 \mathbf{a}_t^2, \quad (2)$$

где $\alpha = \mu_0/6\pi c$. Индексы t и t' показывают, что мощность P в момент t определяется ускорением, которое частица имеет в

более ранний момент $t' = t - l/c$ (эффект запаздывания). Эта формула справедлива лишь для зарядов, движущихся с малыми скоростями ($v \ll c$).

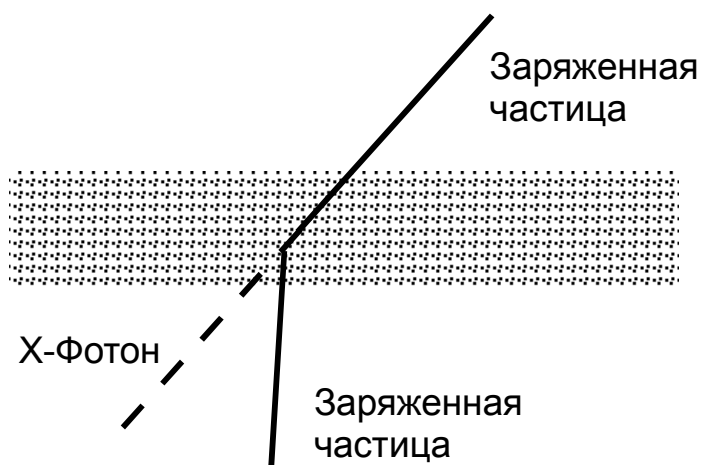


Рис.5. Изменение траектории заряженной частицы при прохождении через вещество в результате взаимодействия с электронной оболочкой атома (заштрихованная часть рисунка соответствует веществу)

В качестве примера можно привести заряженные частицы, движущиеся в циклических ускорителях (бетатроне, циклотроне и др.). Здесь обнаруживается естественный предел для энергии ускоряемой частицы, когда

энергия, сообщаемая частице за период, становится равной энергии излучения.

Под *энергетическим спектром* понимают распределение частиц или квантов по энергии. Фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц, называют тормозным излучением. Часто тормозным излучением называют излучение электронов, ускоряемых электрическим полем атома; цикло-

тронное и синхротронное излучение генерируется заряженной частицей, ускоряемой в стационарном магнитном поле.

Энергетические потери электрона, которые эмитируются в виде рентгеновских квантов, распределяются между нулем и максимальной энергией, которая была приобретена электроном благодаря ускорению в электрическом поле. Если между анодом и катодом приложено напряжение 75 кВ, то электроны приобретают энергию 75 кэВ при прохождении этого напряжения. При торможении в материале анода может быть достигнута максимальная энергия кванта 75 кэВ, то есть распределение многих рентгеновских квантов по энергиям лежит в диапазоне от нуля до максимальной энергии.

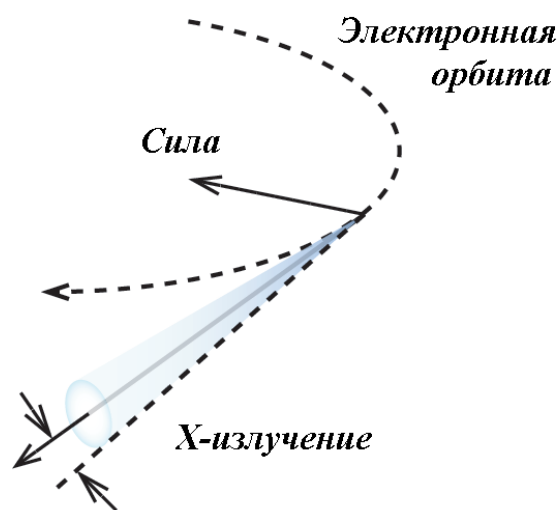


Рис. 6. Излучение при круговом движении электрона

Представляя интенсивность этого вида рентгеновских лучей в зависимости от энергии, получают спектр тормозного излучения трубки (рис. 7).

С увеличением тока трубки при постоянном напряжении увеличивается интенсивность излучения. Увеличение ускоряющего напряжения при заданном анодном токе изменяет спектр излучения со смещением максимума излучения в сторону коротких волн (рис. 7). Это можно объяснить, если предположить, что начальная скорость у электрона на поверхности катода равна нулю, то его кинетическая энергия в момент достижения мишени равна:

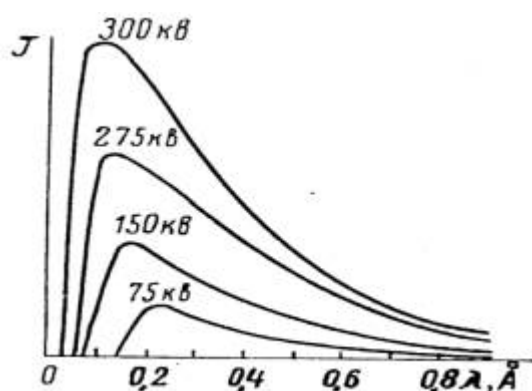


Рис. 7. Спектр тормозного излучения

$$W = \frac{1}{2} m_e v^2 = eU , \quad (3)$$

где m_e — масса электрона; v — его скорость; e — заряд электрона; U — разность потенциалов между катодом и мишенью. При торможении электрона с кинетической энергией eU в мишени может происходить несколько процессов передачи энергии. Вся кинетическая энергия электрона преобразуется в лучевую энергию одного рентгеновского кванта в исключительно редких случаях. При этом интенсивность излучения резко падает вблизи некоей минимальной длины волны λ_{min} , которую можно оценить в ангстремах как:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eU} = \frac{12398}{U} , \quad (4)$$

где U — ускоряющее напряжение рентгеновской трубки в вольтах. Большинство электронов в пучке взаимодействует с электронами, связанными с атомами мишени. Для выбивания электрона из атомов требуется лишь часть энергии налетающих электронов. После того, как налетающий электрон утрачивает часть своей энергии, энергия, трансформируемая в рентгеновский фотон, оказывается меньше, чем eU . Генерируемый таким образом фотон имеет длину волны, превышающую λ_{min} . Обычно испускается излучение, состоящее из фотонов с разной длиной волн. Спектр такого излучения при больших ускоряющих напряжениях (свыше 100 кВ) является в основном непрерывным (рис. 7).

2. Изменение энергетического состояния электронов атома. Оно приводит к выходу из атома фотонов характеристического излучения.

При некоторых, определенных для данного материала анода, ускоряющих напряжениях на фоне непрерывного спектра возникает линейчатый (характеристический) спектр (рис. 8).

Характеристическое излучение возникает тогда, когда падающий электрон обладает энергией достаточной для того, чтобы выбить электрон с одной из внутренних электронных оболочек атома, в этом случае вакантное место занимает электрон с более высокого энергетического уровня, а избыток энергии реализуется в виде излучения. Длина волны рентгеновского кванта будет определяться только разностью энергий этих двух уровней, и повышение

напряжения увеличивает интенсивность, но не изменяет длину волны характеристического излучения анода.

Характеристические спектры весьма просты и классифицируются в порядке возрастания длин волн как K -, L -, M -, N - серии, в соответствии с уровнем, с которого был выбит электрон.

Рассмотрим структуру и принцип образования характеристического спектра. Положение каждого из Z электронов в атоме характеризуется четырьмя квантовыми числами:

а) главное квантовое число

$$n = \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ K- & L- & M- & N- \dots \end{matrix}$$

которому соответствует энергетический уровень электрона в атоме;

б) орбитальный момент $l = n-1, n-2, n-3, \dots 0$;

в) полный момент $j = l+s$ ($s = 1/2$ – спиновый момент электрона)
 $j = \pm 1/2$ ($l \neq 0$), $j = 1/2$ ($l = 0$);

г) магнитное квантовое число $m = \pm j, \pm (j-1), \pm (j-2), \dots$

Таким образом, для электронов K -уровня ($n = 1$) возможны два набора квантовых чисел: $n = 1, l = 0, j = 1/2, m = \pm 1/2$, и согласно принципу Паули на этом уровне может быть только два электрона.

Подобно тому, как заселение разных энергетических уровней лимитируется принципом Паули, так и число линий в характеристическом спектре, т.е. число возможных переходов электрона в атоме с одного энергетического уровня на другие, ограничивается

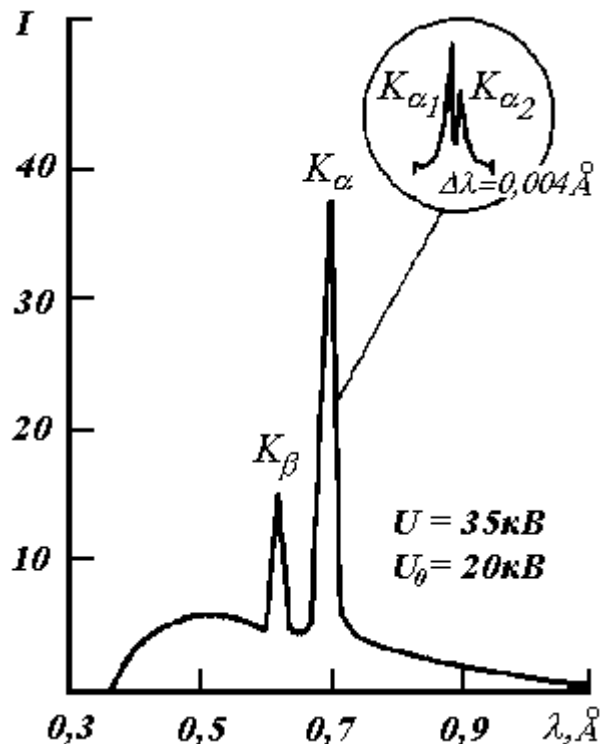


Рис. 8. Коротковолновая часть характеристического спектра излучения молибдена

квантовомеханическими правилами отбора. В приложении к рентгеновским спектрам излучения эти правила можно записать следующим образом: $\Delta n \neq 0$, $\Delta l = \pm 1$, $\Delta j = 0, \pm 1$. Исходя из этих правил, легко выяснить, какие переходы между энергетическими уровнями возможны. На рис. 9 приведена схема энергетических уровней атома, на которой показаны разрешенные электронные переходы и их общепринятые обозначения.

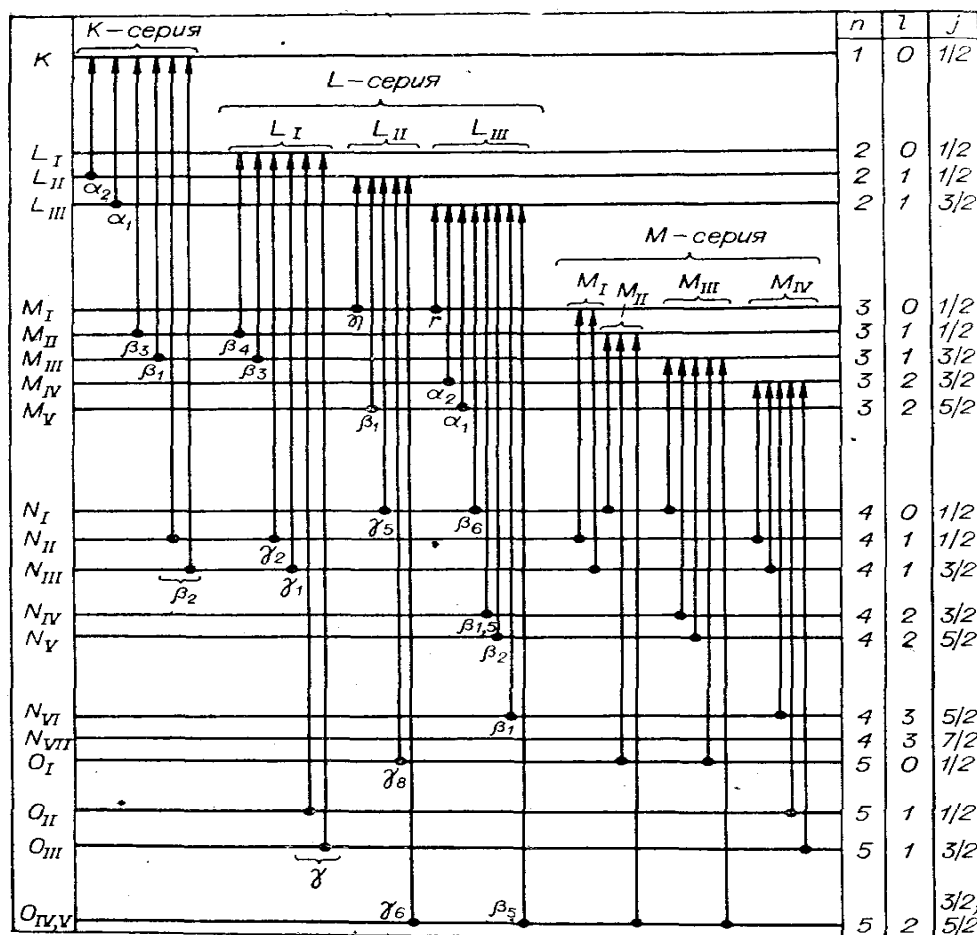


Рис. 9. Схема энергетических уровней атома и разрешенных электронных переходов

3. *Переходы между энергетическими уровнями ядер.* Каждое ядро, как и атом, обладает определенным набором энергетических уровней; переход с одного уровня на другой с более низкой энергией сопровождается выделением энергии, например, в виде фотонного излучения. Поскольку энергетические уровни в ядрах и атомах дискретны, фотонное излучение в указанных выше процес-

сах испускается в виде отдельных спектральных линий. Такое испускание обычно происходит в возбужденных дочерних ядрах после α - или β -распада материнского ядра. Возбуждение ядер может произойти также после взаимодействия ядра с нейтроном, с гамма-квантом или с другими частицами большой энергии (больше нескольких МэВ). Источниками таких фотонов в радиационной технике являются, например, такие радионуклиды, как Cs-137 и Co-60 (рис. 10).

В каждом из этих случаев фотоны испускаются дочерними возбужденными ядрами Ba-137 и Ni-60 после β -распада материнских ядер.

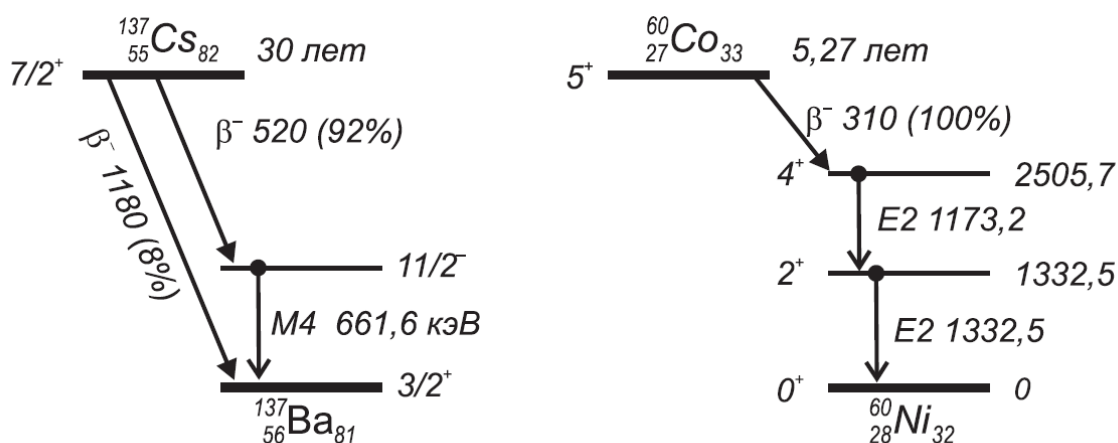


Рис. 10. Схемы распада и гамма-переходы ^{137}Cs и ^{60}Co

2.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

При прохождении через вещество интенсивность рентгеновского и гамма-излучения уменьшается по закону, характерному для электромагнитного излучения (закон Ламберта-Бугера):

$$I = I_0 \exp(-\mu x) , \quad (5)$$

где I и I_0 – конечная и начальная интенсивности излучения, соответственно; μ – полный линейный коэффициент ослабления; x – толщина слоя вещества.

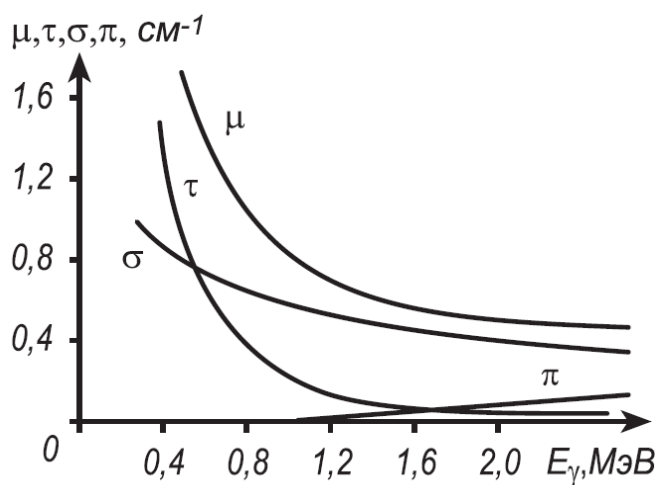


Рис. 11. Зависимость коэффициентов поглощения и рассеяния для свинца от энергии фотонов

Коэффициент μ зависит от длины волны и плотности поглощающего материала. Чтобы μ не зависел от физического состояния вещества, вводят массовый коэффициент ослабления $\mu_\rho = \mu/\rho$ (ρ — плотность вещества).

Собственно полный линейный коэффициент ослабления равен

$$\mu = \tau + \sigma + \pi + \kappa, \text{ где } \tau —$$

линейный коэффициент фотоэффекта, σ — линейный коэффициент Комптон-эффекта, π — линейный коэффициент образования электрон-позитронных пар ($E_\gamma \geq 1,2$ МэВ), κ — линейный коэффициент рэлеевского рассеяния (которое существенно при низких энергиях и не превышает 20%). Коэффициенты $\tau, \sigma, \pi, \kappa$ зависят от атомного номера вещества Z и энергии ионизирующего электромагнитного излучения. На рис. 11. приведены зависимости линейных коэффициентов поглощения и рассеивания для свинца от энергии излучения.

При малых энергиях (до 100 кэВ) ионизирующего излучения, вид зависимости линейного коэффициента ослабления от энергии излучения усложняется. Заметный вклад дает резонансное взаимодействие фотонов с атомом, которое приводит к появлению спектральной структуры в зависимости поглощения от энергии фотонов.

На рис. 12 приведен спектр поглощения рентгеновского излучения — зависимость μ_ρ от длины волны λ . На этой кривой наблюдается несколько “скачков”. Природу этих “скачков” можно понять, рассматривая изменение μ_ρ . По мере уменьшения длины волны сначала наблюдается уменьшение коэффициента поглощения, но при достижении определенной длины волны, например λ_{L111} , воз-

никает резкий скачок μ_p . Одновременно с появлением скачка поглощения усиливается эмиссия фотоэлектронов и в спектре рассеянных лучей появляются линии вторичного характеристического излучения. Появление скачков объясняется тем, что энергия квантов рентгеновского излучения становится достаточной для ионизации электронов с определенного энергетического уровня атомов поглощающего вещества. Появление линий вторичного характеристического излучения связано с излучением квантов при переходах электронов атома на освободившиеся внутренние уровни. При дальнейшем уменьшении длины волны наблюдается еще несколько скачков μ_p : при λ_{LII} , λ_{LI} и λ_K . Каждый из этих скачков связан с ионизацией определенного энергетического уровня. В пределах между двумя соседними скачками коэффициент $\mu_p \sim \lambda^3$.

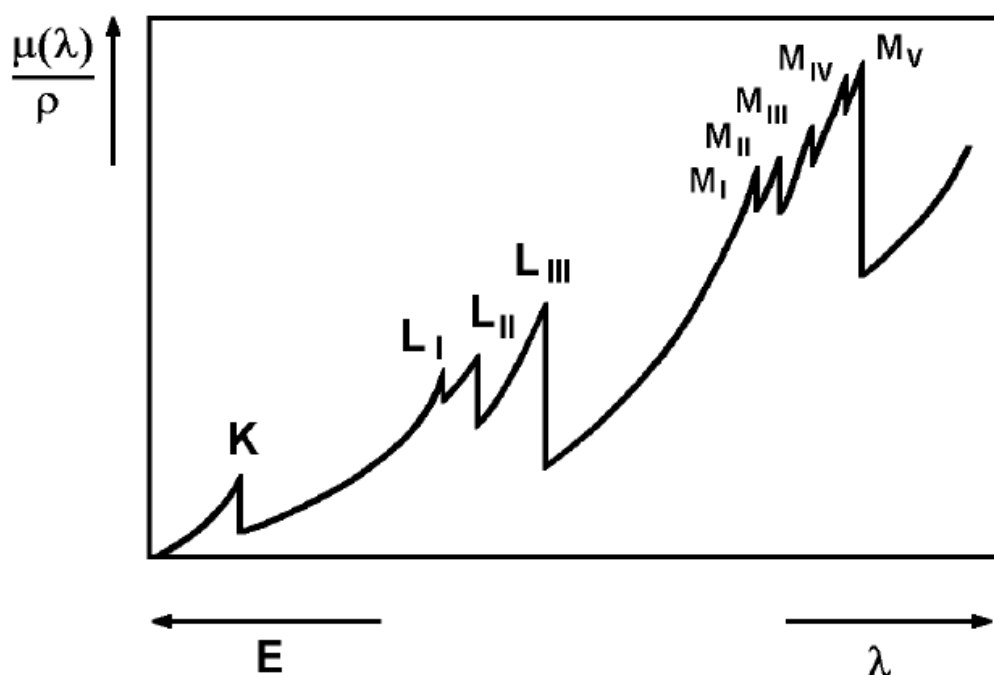


Рис. 12. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны λ

2.3. Основные единицы измерений ионизирующих излучений

Физический смысл единиц измерения, используемых для количественной характеристики параметров ионизирующего излучения и его взаимодействия с веществом, подробно излагается в рамках курса «Ядерная физика» [5]. Поэтому в данном пособии приводятся только названия основных величин и характеристик ионизирующего излучения (табл. 4).

Таблица 4

Единицы измерения ионизирующего излучения

Величина, обозначение	Единицы измерения		Соотношения между единицами измерения
	СИ	Внесист.	
Энергия, E	Джоуль	Эрг, эВ	$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$
Интенсивность излучения, I	Вт/м ²	$\frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$	$1 \frac{\text{эрг}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}} = 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$
Активность, Q	Беккерель	кюри	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./сек}$
Поглощенная доза, D	Грей	рад	$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$
Эквивалентная доза, D_H	Зиверт	бэр	$1 \text{ Зв} = 100 \text{ бэр}$
Экспозиционная доза, D_X	Кл/кг	рентген	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг} \approx 8,7 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$
Мощность экспозиционной дозы, \dot{D}_X	А/кг	Р/с	$1 \text{ Р/с} = 2,582,58 \cdot 10^{-4} \text{ А/кг}$
Гамма-постоянная, $\Gamma_{\text{СИ}}$	$\frac{\text{Гр} \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Бк}}$	$\frac{\text{Р} \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}}$	$1 \frac{\text{Р} \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}} = 0,152 \frac{\text{аГр} \cdot \text{м}^2}{\text{с} \cdot \text{Бк}}$

3. АППАРАТУРА ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

3.1. Рентгеновские аппараты

Рентгеновский аппарат служит для получения рентгеновского излучения с заданными параметрами и состоит из рентгеновской трубки в защитном кожухе, генератора высокого напряжения и пульта управления (рис. 13). В настоящее время применяют аппараты с напряжением от 10 до 400 кВ.

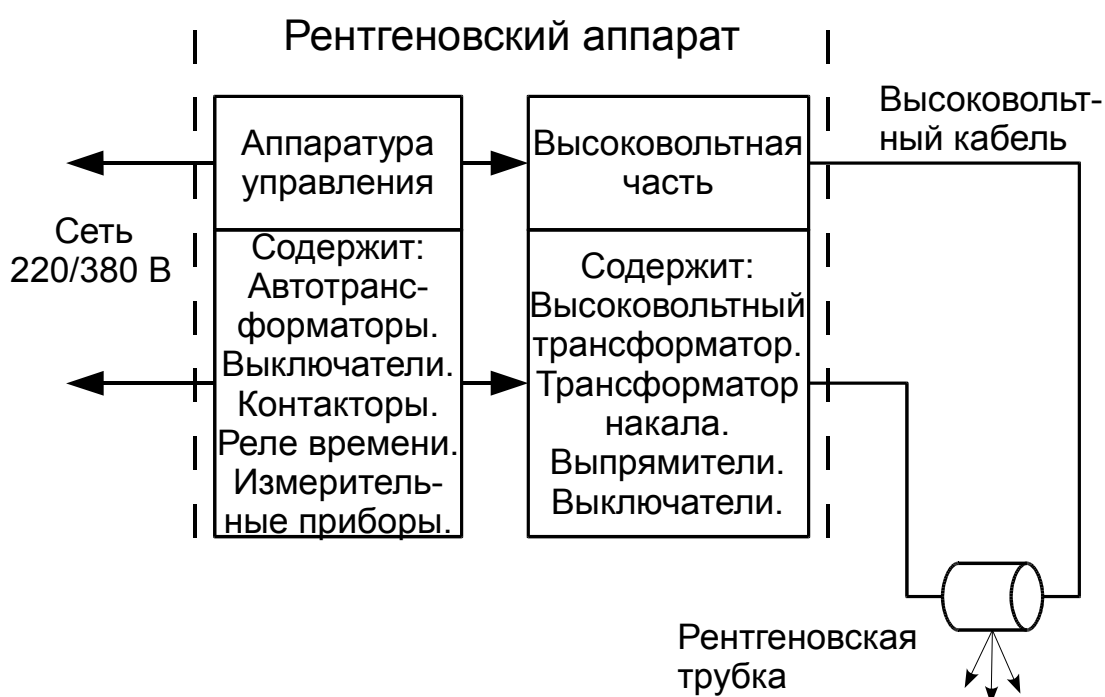


Рис. 13. Блок-схема рентгеновской установки

Высоковольтный генератор преобразует напряжение сети в напряжение питания рентгеновской трубки. Высоковольтный генератор включает: преобразователи переменного тока в постоянный (кенотроны, диоды), конденсаторы для фильтрации и удваивания напряжения, трансформаторы накала рентгеновской трубки, трансформаторы накала кенотронов, выключатели и защитные устройства.

Контрольно-измерительная часть представляет собой группу приборов, которые служат для измерения и регулирования времени, тока, напряжения и частоты (реле времени, измерительные приборы, прерыватели, селекторы, защитные приборы и т.п.).

Рентгеновский излучатель в самом простом случае состоит из рентгеновской трубки и защитного кожуха, заполненного изолирующей средой: трансформаторное масло, воздух или газ под давлением.

Используют два вида рентгеновских аппаратов: аппараты с постоянной нагрузкой и импульсные рентгеновские аппараты.

Аппараты с постоянной нагрузкой в свою очередь выпускают двух типов:

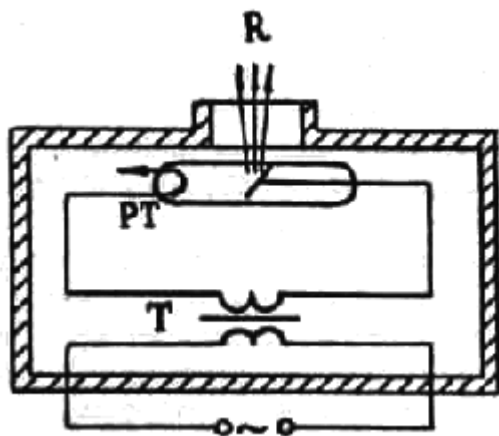


Рис. 14. Типовая схема рентгеновского аппарата-моноблока

1) аппараты-моноблоки, у которых рентгеновская трубка и трансформатор смонтированы в единые блок-трансформаторы, залитые маслом или заполненные газом. К этим аппаратам относят как портативные аппараты для работы в полевых и монтажных условиях (РУП-120-5-1), так и стационарные высоковольтные аппараты (РУП-400-5-1);

2) аппараты кабельного типа, состоящие из самостоятельного генераторного устройства, рентгеновской трубки и пульта управления. Аппараты этого типа выпускают, как правило, передвижными и используют их для работы в цеховых и лабораторных условиях (РУП-150/300-10-1).

Импульсные аппараты в связи с их малым весом и габаритами служат в основном для работы при контроле качества сварных соединений магистральных трубопроводов, в условиях стапеля и монтажа.

Технические характеристики рентгеновских аппаратов приведены в табл. 5.

Аппараты-моноблоки. В аппаратах-моноблоках обычно применяют наиболее простую схему (рис. 14) — полуволновую без выпрямителя. В этих аппаратах на трубку подается ток непосредственно от трансформатора высокого напряжения Т. Рентгеновская трубка РТ пропускает ток только в одном направлении в течение первого полупериода, а затем во время второго полупериода она запирает ток, работая как выпрямитель. Использование подобной схемы сокращает срок службы трубки, но простота устройства аппарата компенсирует этот недостаток.

Таблица 5

Технические характеристики рентгеновских аппаратов

Аппараты	U , кВ	i_{max} , мА	Масса, кг	Потребляемая мощность, кВ·А
1 Моноблоки:				
РУП-160-6П	50-160	6	70	2,0
РУП-400-5-1	250-400	5	600	4,0
2 Кабельные:				
РУП-150/300-10-1	10-250	10	1000	4,0
РУП-200-20-5	70-200	20	750	4,0
РУП-150/300-01	20-300	10	1000	8,0
3 Импульсные				
ИРА-1Д	30-280	В импульсе 200 -3000 А	30	0,1
МИРА-3Д	30-320		22	0,6
РАПС-1М	30-300		40	2,0
ПИОН-2М	150		8	0,08

Кабельные аппараты. В аппаратах кабельного типа применяют, как правило, схемы удвоения напряжения с двумя кенотронами и полупроводниковыми выпрямителями (рис. 15). Во время отрицательного полупериода напряжения конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются через выпрямители B_1 и B_2 до половины амплитудного значения. С приходом положительного полупериода они оказываются включенными последовательно с вторичной обмоткой трансформатора и напряжение на аноде трубки увеличивается в два раза.

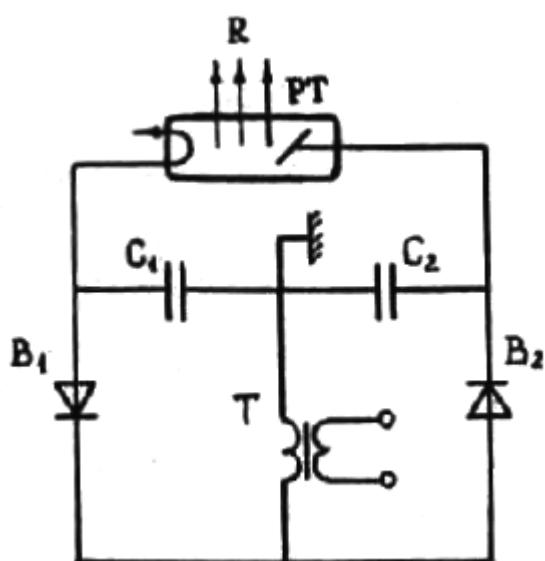


Рис. 15. Типовая схема высоковольтной части рентгеновского кабельного аппарата

Генерирование рентгеновского излучения происходит в течение полупериода. Схема удвоения напряжения позволяет получать высокое напряжение без увеличения размеров трансформатора и качества его изоляции.

Импульсные аппараты. В импульсных аппаратах применяются специальные рентгеновские трубки с холодным катодом.

Используют импульсные схемы с разрядником и пик-трансформатором (рис. 16, где Т —

первичный трансформатор, В — выпрямитель, С1, С2 — накопительные емкости, РК — разрядник-коммутатор, ИТ — импульсный высоковольтный трансформатор, РО — разрядник-обостритель, РТ — рентгеновская трубка).

Вспышка рентгеновского излучения в импульсном аппарате образуется в рентгеновской трубке РТ под действием короткого импульса высокого напряжения, формируемого с помощью разрядника РО. Напряжение на трубку прикладывается со вторичной обмотки импульсного пик-трансформатора ИТ в момент разрядки накопительной емкости С1 через коммутатор РК в первичной обмотке, при этом во вторичной его обмотке возникает импульс высокого напряжения длительностью порядка 10^{-6} с. Этот импульс высокого напряжения заряжает выходную емкость С2 до напряжения 100-200 кВ — в зависимости от пробойного напряжения разрядника-обострителя. Частота вспышек в импульсных рентгеновских аппаратах составляет 5-20 Гц. Ток в импульсе достигает 1000-2000 А и более. Длительность импульса рентгеновского излучения составляет десятки наносекунд.

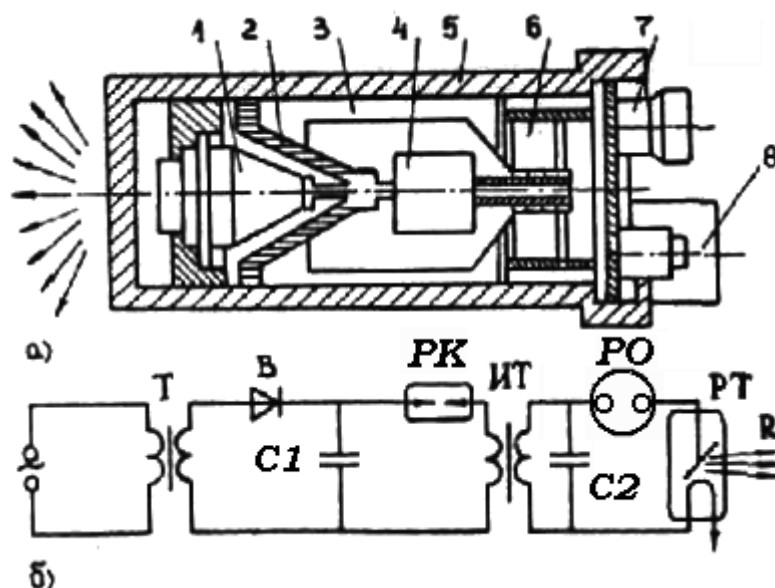


Рис. 16. Конструкция (а) и типовая схема (б) импульсного рентгеновского аппарата: 1 - рентгеновская трубка; 2 - индуктивность; 3 - стакан; 4 - разрядник-обостритель; 5 – корпус; 6 - импульсный трансформатор; 7 - высоковольтный разъем; 8 — маслорасширитель

Напряжение срабатывания разрядника-обострителя является рабочим напряжением рентгеновской трубки. Поэтому для данного конкретного аппарата ускоряющее напряжение всегда одно и то же и не может регулироваться. Разрядник-обостритель состоит из стального цилиндрического корпуса, керамического изолятора в виде усеченного конуса и двух электродов из тугоплавкого металла, один из них припаян к крышке корпуса, другой — к изолятору. Рабочий объем разрядника заполнен техническим водородом или азотом под давлением 30 - 40 атмосфер. Благодаря столь высокому давлению, при пробое межэлектродного зазора электрический импульс с выхода импульсного трансформатора сокращается по длительности примерно в 100 раз, обеспечивается плазменный взрыв микроострий катода рентгеновской трубки.

3.2. Рентгеновские трубки

Все рентгеновские трубки работают по одинаковому принципу: ускорение электронов в электрическом поле и их торможение в

материале анода. Технически это реализуется таким образом, что между нагретым катодом и анодом прикладывается сильное электрическое поле. Электроны испускаются из нагретого материала катода и ускоряются, благодаря приложенному высокому напряжению, в направлении анода. Далее они проникают в материал анода и теряют там свою энергию в результате торможения. При этом необходимо вакуумировать путь прохождения пучка, чтобы избежать столкновения с молекулами газа. Выход рентгеновского излучения из корпуса осуществляется обычно через тонкое бериллиевое окно, пронизываемое для этого излучения. Место на аноде, куда попадают ускоренные электроны и откуда излучается рентгеновский пучок, называется фокусным пятном, или *фокусом трубки*. Типичные размеры фокусных пятен современных микрофокусных трубок находятся в пределах 1 - 100 мкм, минифокусных трубок — 0,1 - 0,4 мм, стандартных — более 0,4 мм.

Основные конструктивные различия трубок заключаются в способе подключения высокого напряжения, длительности генерации излучения, в направлении выходного излучения. Наиболее важные типы трубок, применяемые в рентгеновской дефектоскопии, – это трубка обычной двухэлектродной конструкции двух- и однополярные; специализированные конструкции с вынесенным полым анодом; с вращающимся анодом; импульсные и высоковольтные (свыше 400 кВ).

Трубка средней мощности (рис. 17) состоит обычно из вакуумно-плотного баллона (давление порядка 10^{-4} Па), изготовленного из стекла или по металлокерамической технологии. Для этих целей обычно используется боросиликатное стекло (B_2O_3 , SiO_2), которое позволяет применять стеклянно-металлические вводы на основе сплава кобальта, имеющего коэффициент теплового линейного расширения, как и у стекла. Трубки со стеклянным баллоном чувствительны к тепловым и механическим ударам. Баллон металлокерамических трубок представляет собой металлический цилиндр, закрытый с обеих сторон керамическими дисками, обычно из окиси

алюминия. Высокие изоляционные характеристики такой керамики позволяют уменьшить размеры излучателей.

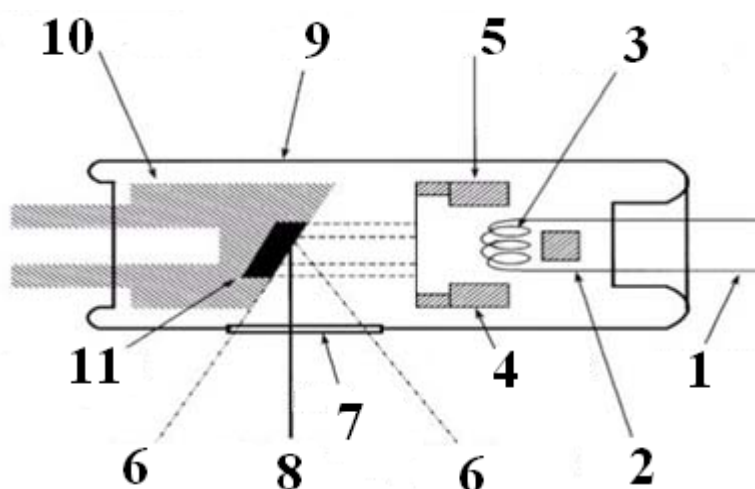


Рис. 17. Схема рентгеновской трубки: 1 — подводящие провода, 2 — провод, 3 — вольфрамовая спираль; 4 — фокусирующая трубка; 5 — катод, 6 — угол скоса, 7 — окно из Ве, 8 — центр генерации рентгеновского излучения, 9 — стеклянная оболочка, 10 — высоковольтный анод, 11 — вольфрамовая мишень

Катодный узел включает вольфрамовую нить накала, окруженную металлическим электродом, создающим вокруг нее такую конфигурацию электрического поля, при которой электроны, выходящие из катода, движутся к аноду в виде узкого электронного пучка. Нить обычно питается переменным током (50 Гц) от отдельного регулируемого трансформатора. Ток нити накала находится в пределах 1...10 А. Ток трубки лежит в диапазоне нескольких десятков микроампер, у микрофокусных трубок — до 20 мА.

Анод рентгеновских трубок изготавливают из материала, обладающего высокой удельной теплопроводностью, например, из меди, а мишень анода — из вольфрама. Мишень плотно размещается в медном аноде для обеспечения высокой теплопроводности.

Только малая часть энергетических потерь электронов испускается в виде рентгеновских квантов. Большая часть энергии ух-

дит на нагрев материала анода. Отсюда следует, что анод должен охлаждаться. Технически это реализуется подключением циркуляционного контура водяного или масляного охлаждения, либо анода вращения.

КПД рентгеновской трубки η — отношение доли электрической мощности трубки, переходящей в излучение, ко всей мощности, воспринимаемой анодом, полуэмпирически записывается в виде:

$$\eta = 1,4 \cdot 10^{-9} \cdot Z \cdot U . \quad (6)$$

Его численные значения малы и составляют для вольфрамовой мишени примерно 1% при напряжении 100-150 кВ.

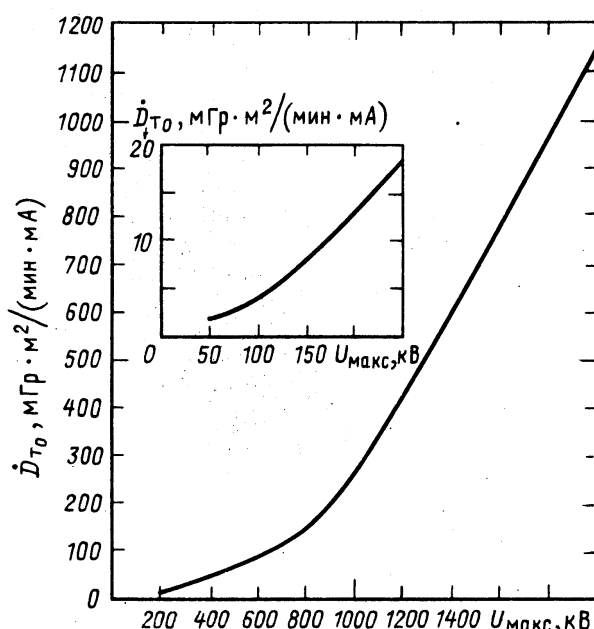


Рис. 18. Радиационный выход рентгеновских трубок в зависимости от напряжения на трубке

да; i — ток трубки; t — время работы трубки; F — расстояние от анода трубки до детектора (фокусное расстояние).

Интенсивность излучения фотонного пучка, генерируемого трубкой, можно выразить формулой:

$$\Phi = k Z U^2 I_a , \quad (8)$$

Лучевая отдача трубки зависит в основном от ускоряющего напряжения и предварительной фильтрации излучения. Пользуясь графиком рис. 18, можно подсчитать мощность поглощенной дозы \dot{D} и поглощенную дозу D излучения, создаваемые рентгеновской трубкой на расстоянии F от ее анода, по формулам:

$$\dot{D} = \frac{\dot{D}_{T_0} i}{F^2} \quad \text{и} \quad D = \frac{\dot{D}_{T_0} i t}{F^2} , \quad (7)$$

где \dot{D}_{T_0} — радиационный выход трубки при напряжении U_{max} на расстоянии 1 м от анода;

где k — коэффициент пропорциональности; Z — атомный номер материала анода; U — напряжение, подаваемое на трубку; I_a — ток трубки.

В импульсных рентгеновских аппаратах используется не обычная рентгеновская трубка с накальным катодом, а так называемая трубка с взрывной электронной эмиссией (с холодным катодом). В качестве катода в такой трубке используется вольфрамовая фольга толщиной в несколько микрон. Под действием импульса высокого напряжения очень короткой длительности (который обеспечивается разрядником-обострителем) кромка вольфрамового катода взрывается, образуется облако плазмы, которая является источником электронов. Далее процесс ускорения электронов и возбуждения рентгеновского излучения протекает так же, как и в классических рентгеновских трубках с накальным катодом. В настоящее время отечественной промышленностью выпускаются 2 типа импульсных рентгеновских трубок — игольчатая и прострельного типа.

Максимальное рабочее напряжение игольчатой трубки типа ИМА 5-320 Д составляет 320 кВ. Катод в виде шайбы изготовлен из вольфрамовой фольги. Внутренняя кромка шайбы является взрывной кромкой, эмитирующей плазму. Анод выполнен из вольфрамового прутка малого диаметра, заточенного на конус. Конец этого прутка является фокусным пятном трубки. Трубка пригодна как для направленного, так и для панорамного просвечивания.

Трубка прострельного типа ИМА 2-150 Д рассчитана на максимальное напряжение 150 кВ. Здесь катод выполнен из вольфрамовой фольги, скрученной в трубку малого диаметра, и установлен на грибовидный электрод. Данный электрод защищает стеклянный конический изолятор от конденсации паров металла, образующихся при плазменном разряде. Прострельный вольфрамовый анод приварен непосредственно к выходному окну. В данной трубке электроны из плазмы, образующейся на кончике цилиндрического катода, бомбардируют плоский заземленный анод, а рентгеновские фотоны проходят сквозь него и выходное окно. Достоинством

такой конструкции является возможность размещения исследуемого объекта вплотную у выходного окна трубки. Недостатком же является менее четкое фокусное пятно. К тому же эта трубка имеет большие размеры по сравнению с игольчатой трубкой.

Импульсные аппараты генерируют серию мощных коротких импульсов рентгеновского излучения длительностью 10-20 нс, с плотностью потока фотонов порядка 10^{18} фотонов/с. Вместе с тем, время накопления энергии для следующего импульса достаточно велико, порядка 0,1 с, поэтому мощность дозы в несколько десятков раз меньше, чем у непрерывно излучающих аппаратов при том же напряжении.

Спектр излучения импульсной рентгеновской трубки отличается от трубки с постоянным напряжением. Максимум интенсивности спектра импульсного аппарата сдвинут в сторону больших длин волн, т.е. меньших энергий. Кроме того, непрерывный спектр импульсной рентгеновской трубки имеет более протяженный вид.

3.3. Гамма-дефектоскопы

Гамма-дефектоскопы предназначены для выявления скрытых дефектов сварных соединений и других изделий просвечиванием их гамма-излучением радионуклидов. Дефектоскопы состоят, как правило, из следующих узлов: радиационной головки с защитным блоком, в котором находится источник гамма-излучения; привода, управляющего выпуском и перекрытием пучка излучения; систем сигнализации об излучении и наведении пучка на объект контроля.

Радиационная головка (рис. 19) состоит из кожуха 1 с защитным слоем 3, в котором находится ампула 2 с источником излучения. Перемещение ампулы производится с помощью троса 4, положение ампулы фиксируется рукояткой 5.

В комплект гамма-дефектоскопов входят также штативные устройства, вспомогательные принадлежности, транспортно-перезарядные контейнеры для безопасной транспортировки и перезарядки источников в эксплуатационных условиях, климато-

ры и диафрагмы, обеспечивающие получение пучков излучения различной формы и размеров.

По своей конструкции гамма-дефектоскоп должен быть прост, прочен, надежен в эксплуатации и мобилен. Основные характеристики некоторых гамма-дефектоскопов даны в табл. 6.

Такие гамма-дефектоскопы, как РИД-21М, "Стапель-5М" и др., являются портативными и полностью автономными. Это обеспечивает их

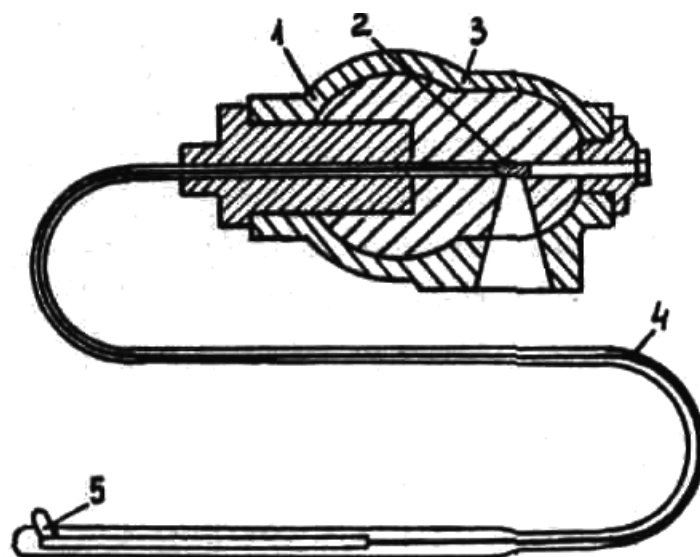


Рис. 19. Принципиальная схема радиационной головки

успешное использование в полевых и монтажных условиях при отсутствии электроэнергии. Шланговые гамма-дефектоскопы типа РИД-21М, в которых источник излучения может подаваться из радиационной головки по ампулопроводу в зону контроля на расстояние до 12 м, оказываются незаменимыми при фронтальном и панорамном просвечивании сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах.

Гамма-дефектоскопы для фронтального просвечивания ("Трасса", "Стапель-5М" и др.) обеспечивают выпуск и перекрытия конусных, пирамидальных и кольцевых пучков непосредственно из радиационной головки с помощью встроенных или сменных коллиматоров. Применяют гамма-дефектоскопы и других марок, например, "Газпром", для просвечивания труб и др.

В качестве защитных материалов, эффективно ослабляющих излучение, в радиационных головках и контейнерах используют свинец, сплавы на основе вольфрама или обедненный уран. Защитные блоки всех гамма-дефектоскопов ослабляют гамма-излучение до безопасных уровней.

Таблица 6

Технические характеристики гамма-дефектоскопов (m — масса радиационной головки, d — диаметр активной части)

Дефектоскоп	m , кг	d , мм	Источник излучения		$\dot{D}_x(F=1 м)$	
			Вид	Тип	А/кг	Р/с
Гаммарид 192/120 К	16	5,0	Cs-137	ГИД-Ц-2	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$
		4,0	Ir-192	ГИД-И-6	$3,85 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
РИД-21М	25	5,0	Cs-137	ГИД-Ц-2	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$
		2,0	Ir-192	ГИД-И-4	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
РИД-41	900	7,0	Co-60	ГИД-К-8	$3,1 \cdot 10^{-5}$	0,12
Газпром	20	5,0	Cs-137	ГИД-Ц-2	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$
		2,0	Ir-192	ГИД-И-4	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Стапель-5М	8	1,5	Ir-192	ГИД-И-3	$3,85 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Трасса	21	5,0	Cs-137	ГИД-Ц-2	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-4}$

4. ВЫЯВЛЕНИЕ И АНАЛИЗ ДЕФЕКТОВ ИЗДЕЛИЯ

4.1. Радиографическая пленка как детектор

Радиографические пленки являются основным видом детекторов при радиационном контроле. Их действие основано на фотохимическом эффекте взаимодействия ионизирующих излучений с веществом.

Радиографические пленки в процессе экспонирования отображают изменения интенсивности излучения, прошедшего через объект контроля. Эти изменения интенсивности соответствуют изменению плотности ρ и коэффициента поглощения μ в объекте контроля, и эти изменения можно связать с наличием в нем дефектов. Пленки обладают способностью интегрально регистрировать чрезвычайно низкие интенсивности излучения за длительное время просвечивания в широком диапазоне энергий. Фотографическая эмульсия содержит чувствительное к излучению химическое вещество (бромистое серебро с небольшой примесью йодистого

серебра), которое равномерно, в виде зерен, распределено в тонкой органической пленке (желатин). Эмульсия нанесена на подложку (целлюлоза, стекло, бумага) с обеих сторон. Под воздействием излучения в фоточувствительных зернах эмульсии происходят изменения, приводящие к образованию центров проявления — мелких металлических частиц, состоящих из нескольких атомов. Химическая обработка фотослоя приводит к восстановлению зерен, в которых появились центры проявления, до металлического состояния, и при этом изменяется оптическая плотность пленки. При последующей обработке пленки закрепителем (фиксацией), те зерна, которые не восстановились до металлического состояния, вымываются. Обычно более интенсивное излучение приводит к более сильному почернению пленки.

Проявленная пленка характеризуется плотностью почернения S , которая определяется как

$$S = \lg(1/\tau), \quad \text{где} \quad \tau = \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

— коэффициент пропускания, равный отношению светового потока, прошедшего через пленку видимого света, к световому потоку падающего на пленку света. Кривую зависимости плотности почернения пленки от логарифма относительной экспозиции $S(\Delta \lg X)$ называют *характеристической кривой* (рис. 20). На плотность почернения пленки,

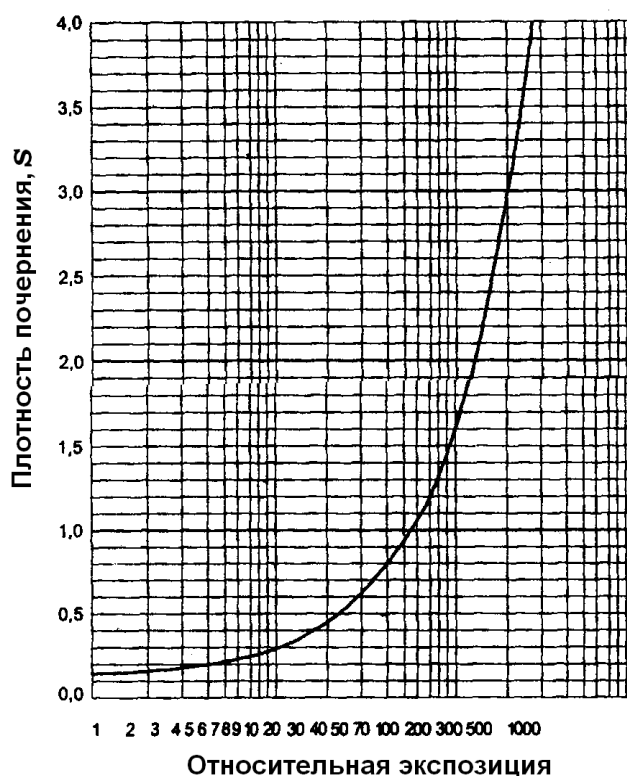


Рис.20. Типичная характеристическая кривая для пленок Kodak IDUSTREX

помимо дозы излучения, влияют также сорт пленки, состав и температура проявителя, длительность проявления и т.п. Для экспери-

ментального определения плотности почернения радиографической пленки используют *денситометр*.

Радиографические пленки подразделяются на два класса: 1) безэкранные пленки, предназначенные для использования без флюоресцентных экранов, или с металлическими усиливающими экранами; 2) экранные пленки, предназначенные для использования с флюоресцентными усиливающими экранами, поскольку чувствительность этих пленок лежит в видимой и ультрафиолетовой части спектра.

Каждый тип пленки обладает чувствительностью, измеряемой величиной, обратной экспозиционной дозе излучения, при которой степень почернения на определенное значение (0,85) больше плотности вуали на пленке. Чувствительность пленки обозначают $S_{0,85}$ и измеряют в P^{-1} . Технические характеристики основных рентгеновских пленок представлены в табл. 7.

Таблица 7

Технические характеристики рентгеновских пленок

Тип пленки	Чувствительность пленки $S_{0,85}$, P^{-1}		Разрешающая способность, линий/мм	Примечания ¹
	без экранов	с экраном		
РТ-1	50-60	100	68-73	ВЧ, БЭ
РТ-2	25	350	68-73	ВЧ, Э
РТ-3	20-30	35-45	80-110	ВЧ, БЭ
РТ-4М	9-12	-	110-140	МЗ, БЭ
РТ-5	3-5	13	140-180	ОМЗ, БЭ

Пленки РТ-1 и РТ-3 безэкранные и наиболее чувствительные. Экранные пленки РТ-2 обладают высокой чувствительностью и обеспечивают высокую эффективность контроля при использовании флюоресцирующих экранов. Безэкранный мелкозернистый пленка РТ-4М имеет среднюю чувствительность. Безэкранный особомелкозернистый пленка РТ-5 обладает наибольшей разрешающей способностью и наименьшей чувствительностью.

1 ВЧ — высокочувствительная, МЗ — мелкозернистая, ОМЗ — особомелкозернистая, Э — экранная, БЭ — безэкранный.

4.2. Выбор параметров радиографического контроля

Основными параметрами, выбираемыми при рентгенографическом контроле, являются: напряжение на рентгеновской трубке U , тип рентгеновской пленки и тип усиливающего экрана, фокусное расстояние F и экспозиция.

Напряжение на рентгеновской трубке, как отмечалось выше, влияет на энергетический спектр и интенсивность излучения. Энергетический спектр $I(E)$ в свою очередь определяет проникающую способность излучения и чувствительность контроля.

Выбор *радиографической пленки* определяется необходимостью получения рентгеновского снимка с определенной контрастностью и четкостью изображения. Контрастность пленки, ее чувствительность и зернистость взаимосвязаны между собой, высокочувствительные пленки имеют крупные зерна и низкий предел разрешения, а низкочувствительные — мелкие зерна и высокий предел разрешения. Поэтому с экономической точки зрения желательно, чтобы время экспонирования пленки было как можно короче, использование высокочувствительной пленки ограничивается ее зернистостью, которая в значительной мере определяет качество изображения мелких дефектов. Часто производители пленок (например Kodak) для контроля конкретных объектов рекомендуют к применению определенный тип чувствительного материала.

Усиливающие металлические и флуоресцентные экраны применяют для сокращения времени просвечивания. Усиливающее действие экранов характеризуется коэффициентом усиления, определяемым отношением времен просвечивания без экрана и с экраном.

Усиливающее действие металлических экранов, используемых при контроле методом прямой экспозиции, определяется вторичными электронами, образующимися в экране при прохождении через него ионизирующего излучения. Экраны изготавливают из фольги тяжелых металлов (Pb, W, Sn и др.). Для каждого источника ионизирующего излучения материал экрана следует выбирать в

зависимости от его энергии, в частности, для рентгеновского излучения целесообразно использовать олово, вольфрам, свинец, для гамма-излучения — вольфрам, свинец. Толщина экрана должна соответствовать максимальной длине пробега вторичных электронов в экране. При изменении толщины фольги либо уменьшается коэффициент преобразования энергии излучения в кинетическую энергию вторичных электронов, либо ослабляется интенсивность ионизирующего излучения, и вследствие этого уменьшается усиливающее действие экрана. При применении металлических экранов практически не ухудшается разрешающая способность.

Усиливающее действие флуоресцентных экранов определяется действием фотонов видимой и ультрафиолетовой областей спектра, высвечиваемых из люминофоров при прохождении через них ионизирующего излучения. В качестве люминофоров используют ZnS , CdS , $BaSO_4$, $PbSO_4$, $CaWO_4$ и др. Флуоресцентные экраны изготавливают в виде пластмассовых или картонных подложек, на которые наносят слой люминофора. Эти экраны рекомендуется использовать со специально приспособленными рентгеновскими пленками, поскольку спектральная чувствительность эмульсии таких пленок и спектр свечения экранов хорошо согласуются. При использовании флуоресцентных экранов разрешающая способность изображения на пленках существенно ухудшается из-за крупнозернистости экранов.

С помощью флуоресцентных экранов получают меньшие экспозиции, а при использовании металлических экранов — лучшую чувствительность.

Коэффициенты усиления для различных комбинаций пленок и экранов приведены в табл. 8.

При промышленной радиографии основным показателем качества выполненного снимка является *относительная чувствительность*, под которой понимают отношение (в %) размера минимального выявляемого дефекта или элемента эталона чувствительности к толщине просвечиваемого изделия.

Таблица 8

Коэффициент усиления k^1 для рентгеновских пленок (при $S = 1,5-1,8$, $E = 50$ кэВ, $U = 80$ кВ)

Типы экранов	Рентгеновские пленки				
	РТ-1	РТ-3	РТ-4	РТ-6	РТ-2
Без экранов	1	1,8	5	15	2
Металлические свинцовые	0,5	0,9	2,5	7,5	1
Флуоресцентные:					
Стандарт	1,5	1,2	2,9	14	0,29
УФД-П/2	0,77	0,58	1,4	6,8	0,14
УФД-П/3	0,51	0,39	0,95	4,5	0,09
СБ	0,91	0,70	1,7	8,1	0,17

Однако измерение чувствительности по эталону еще не дает представления о реальных размерах выявленных дефектов, а служит лишь средством оценки качества изображения дефектов на пленке. Используют различные типы эталонов: проволочные, пластинчатые или ступенчатые с канавками и отверстиями. Проволочные эталоны лучше, чем эталоны с канавками, имитируют дефекты сварки типа трещин и непроваров. Пластинчатые и ступенчатые эталоны с отверстиями хорошо имитируют дефекты типа пор, раковин, шлаковых включений. Выбор того или иного эталона чувствительности зависит от конкретной задачи контроля и обычно регламентируется техническими условиями.

Наиболее распространенным является канавочный эталон чувствительности (рис. 21), который устанавливается на контролируемом изделии со стороны источника излучения; относительная чувствительность метода при этом определяется как

$$K = \frac{\Delta h}{d+h} \cdot 100\% , \quad (9)$$

¹ Значение k равно отношению времени просвечивания при использовании комбинации пленки и экрана и времени просвечивания для пленки РТ-1 без экрана.

где Δh — минимальная глубина канавки, видимой на пленке; d — толщина контролируемого изделия; h — толщина эталона чувствительности.

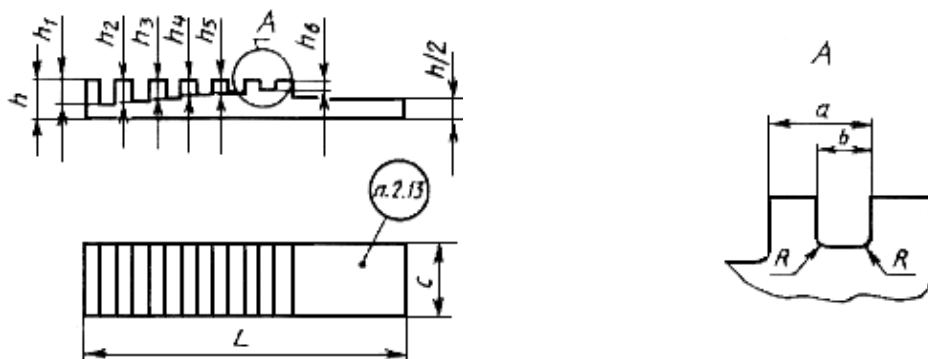


Рис. 21. Канавочный эталон чувствительности

Чувствительность контроля тем выше, чем ниже энергия источника ионизирующего излучения (рис. 22), поэтому напряжение на трубке должно быть выбрано как можно меньшим, при сохранении приемлемой по времени экспозиции.

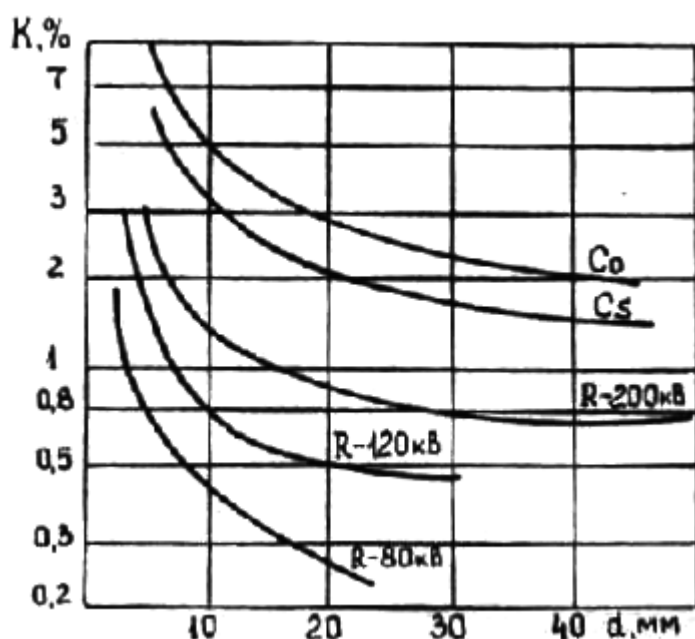


Рис. 22. Изменение чувствительности контроля при радиографии стали в зависимости от толщины материала и энергии излучения

Радиография позволяет получить наиболее высокую чувствительность контроля по сравнению с другими методами радиаци-

онного контроля. Она составляет для рентгенографии 1,5-2 %, а для гаммаграфии — 3-5 % толщины контролируемого соединения.

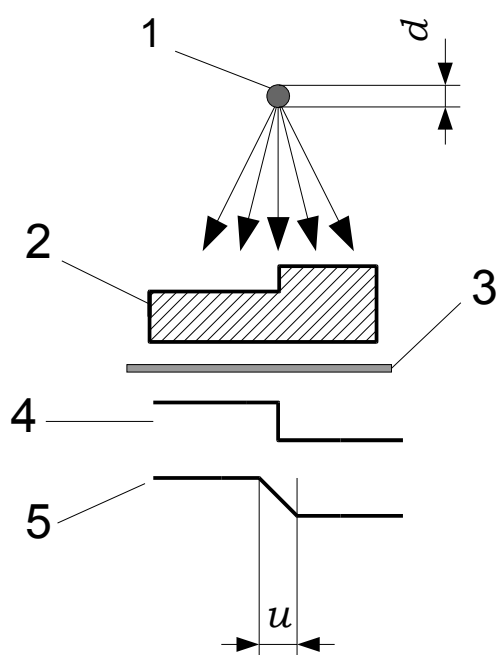


Рис. 23. Схема формирования нерезкости: 1 — источник излучения; 2 — объект контроля с резким изменением толщины; 3 — радиографическая пленка; 4 — профиль радиационного изображения; 5 — сглаженный профиль оптической плотности снимка объекта контроля

Существенное влияние на выявляемость дефектов оказывает радиографическая *общая нерезкость изображения* *и* (рис. 23), которая характеризуется величиной размытия краев на радиографическом снимке. Величина нерезкости при просвечивании зависит от геометрии просвечивания, микроструктуры пленки и процессов взаимодействия ионизирующего излучения с веществом пленки (образованием фотоэлектронов, комптоновских электронов и их пробегом в эмульсии).

Геометрическая нерезкость u_z зависит от размеров источника излучения и геометрических условий просвечивания и определяется размером фокусного пятна или активной части d , фокусным расстоянием F , толщиной объекта контроля δ , расстоянием от контролируемого

предмета до пленки и размером поля облучения. Геометрическую нерезкость можно оценить соотношением $u_z = d\delta / (F - \delta)$. Для уменьшения геометрической нерезкости следует применять источники излучения с малым фокусным пятном.

Однако уменьшение d приводит к снижению интенсивности излучения и увеличению времени экспозиции.

Внутренняя нерезкость u_e пленок зависит от рассеяния вторичных электронов в эмульсионном слое пленки, т.е. от энергии излучения и типа усиливающего экрана (табл.9).

Таблица 9

Зависимость величины внутренней нерезкости от типа излучения и усиливающих экранов

Тип излучения	Тип усиливающего экрана	Внутренняя нерезкость u_e , мм	
		мелкозернистая пленка	крупнозернистая пленка
Рентгеновское излучение	флюоресцентные экраны	0,1	0,5
	свинцовые экраны	0,025	0,1
50 кэВ		0,03	0,05
100 кэВ		0,05	0,1
200 кэВ		0,09	0,12
300 кэВ		0,12	0,15
400 кэВ		0,15	0,2
1000 кэВ		0,24	0,3
2000 кэВ		0,32	0,45
Гамма излучение ^{192}Ir	свинцовые экраны	0,13	0,20
Гамма излучение ^{137}Cs	свинцовые экраны	0,27	0,30
Гамма излучение ^{60}Co	свинцовые экраны	0,36	0,5

Значение *нерезкости рассеяния* можно оценить из уравнения $u_p = u_e g^\delta$, где δ — толщина объекта (см), g — коэффициент пропорциональности. Для рентгеновского излучения $g \approx 1,25$, для ^{192}Ir $g = 1,15$, для ^{137}Cs $g = 1,09$, для ^{60}Co $g = 1,04$.

Нерезкость смещения, которая возникает вследствие движения источника, объекта контроля и пленки, можно устранить, применяя жесткие держатели источников, детекторов и объектов контроля.

Фокусное расстояние F следует выбирать таким образом, чтобы геометрическая нерезкость u_z была соизмерима со значением внутренней нерезкости u_s ($u_z \approx u_s$).

Когда источник излучения не является точечным, формируемая тень не обладает идеальной резкостью. Степень геометрической нерезкости любой тени зависит от размеров источника излучения (фокусного пятна или активной части) и от положения контролируемого объекта между источником и радиационным изображением (рис. 24). Из подобия треугольников можно показать что:

$$u_z = d \frac{\delta^*}{F_0} = d \frac{\delta^*}{(F - \delta^*)}, \quad (10)$$

где d — размер источника излучения; δ^* — расстояние от элемента объекта контроля до рентгеновской пленки; F_0 — расстояние от источника излучения до объекта контроля; F — фокусное расстояние. Исходя из этого для определения фокусного расстояния часто используют соотношение:

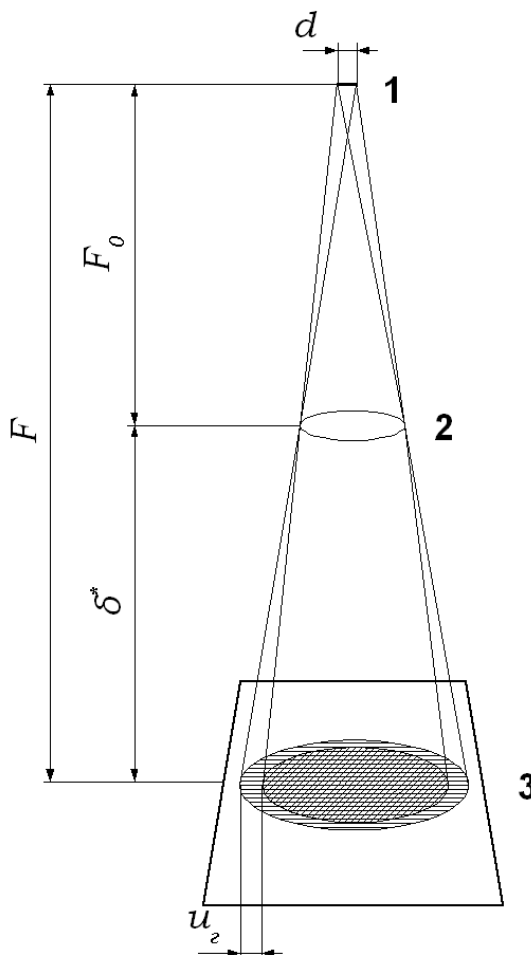


Рис. 24. Схема формирования геометрической нерезкости от фокусного расстояния: 1 — источник излучения, 2 — элемент объекта контроля, 3 — изображение на пленке

$$F = \delta^* \left(\frac{d}{u_s} + 1 \right). \quad (11)$$

Если рентгеновскую пленку помещать непосредственно на объект контроля, то δ^* можно считать равной толщине объекта δ .

Условие соразмерности геометрической нерезкости внутренней определяют из условий: $u_z \leq u_e$ при просвечивании тонкостенных изделий; $u_z \leq u_p$ при просвечивании изделий большой толщины, когда рассеянное излучение существенным образом ухудшает выявляемость дефектов. В последнем случае общая нерезкость изображения при $u_z = u_p$ для ступенчатых дефектов (непровары, трещины и т.д.) приблизительно равна $u \approx 1,25 u_p$ и для овальных дефектов (поры, раковины и т.д.) $u \approx 1,43 u_p$.

В стандартах, регламентирующих радиационную дефектоскопию, для выбора фокусных расстояний используют номограммы, построенные на основе зависимостей:

- $\frac{F}{d} = 15 \delta^{*2/3}$ — для объектов и техники ответственного назначения (класс В);
- $\frac{F}{d} = 7,5 \delta^{*2/3}$ — для объектов и техники неответственного назначения (класс А).

Первая из приведенных зависимостей основана на предположении, что $u_z = 2u_e$, а u_e выбирается из табл. 9.

Увеличение фокусного расстояния F позволяет уменьшить нерезкость, но при этом снижается интенсивность излучения и увеличивается время экспозиции. Значение F следует выбирать оптимальным. Обычно оно составляет 500-1000 мм.

Размер поля облучения выбирают таким, чтобы изменение оптической плотности посередине и на краях снимка не превышало 10 %. Например, для листовых конструкций длину l контролируемого за одну экспозицию участка шва определяют по соотношению $l \leq 0,8f$ (где f - расстояние от источника излучения до поверхности контролируемого шва).

Экспозиция X для рентгеновских аппаратов представляет собой произведение тока трубки на время облучения и измеряется обычно в миллиампер-минутах или миллиампер-секундах.

Выбор экспозиции производят по номограммам (рис. 25) либо подбирают опытным путем с помощью экспонометров (дозиметров

типа ДК-0.2) — измеряют дозу облучения при разных значениях экспозиции и затем выбирают нужную.

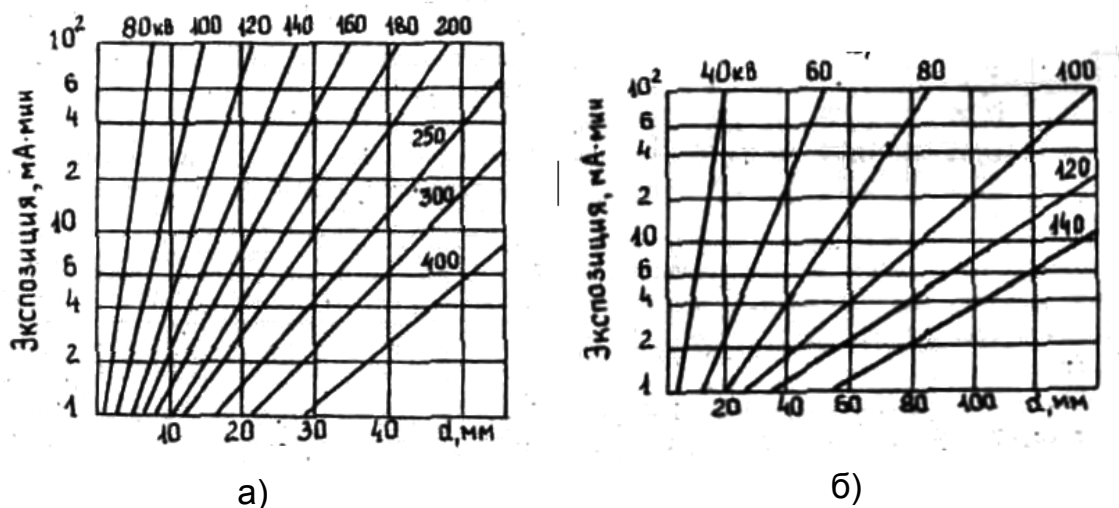


Рис. 25. Номограммы экспозиций при радиографии сталей (а) и алюминиевых сплавов (б) рентгеновскими лучами (пленка РТ-1, $F = 750$ мм, экран свинцовый $\delta = 0,05$ мм, $S = 1,5$)

Номограммы рентгеновских экспозиций представляют собой графические зависимости между толщиной материала, напряжением на рентгеновской трубке и экспозицией. При планировании режимов просвечивания каждую конкретную номограмму можно использовать только при определенной совокупности условий, включающих тип рентгеновского аппарата, конкретное фокусное расстояние, тип пленки и экранов, условия обработки пленки с указанием оптической плотности снимка. Номограммы дают достаточно точную информацию для оценки режимов просвечивания ОК в виде пластины, но при просвечивании ОК, толщина которого изменяется в широких пределах, их можно использовать только в качестве первого приближения.

Такие номограммы, построенные для наиболее распространенных рентгеновских аппаратов и типов пленок, существуют для сплавов железа, алюминия, титана и магния и приведены в специальной литературе [6-9].

В каждом конкретном случае желательно составить номограмму экспозиций, соответствующую используемому типу аппарата, пленки и условиям контроля. Для того, чтобы составить номограмму экспозиций, получают серию радиографических снимков ступенчатого клина, изготовленного из того же материала, что и объект контроля. При этом для ряда анодных напряжений на рентгеновской трубке (через 10...30 кВ) клин последовательно рентгенографируют при различных экспозициях. Полученные пленки обрабатывают в соответствии со стандартной методикой. На каждом радиографическом снимке получается изображение клина в виде серии элементов с различной оптической плотностью. Выбрав определенную оптическую плотность почернения, например $S = 2$, с помощью денситометра определяют местонахождение изображения элементов с этой плотностью на каждой радиограмме. Для каждого такого элемента имеется информация о толщине клина, напряжении рентгеновской трубки и экспозиции. При отсутствии на рентгенограмме заданной плотности почернения соответствующую толщину материала оценивают путем интерполяции. Затем значения толщины материала, напряжения и экспозиции для каждого элемента с заданной оптической плотностью наносят на график. Экспозицию в миллиампер-минутах откладывают по логарифмической шкале, а толщину материала — по линейной шкале.

Второй способ составления номограммы экспозиций требует меньше снимков, но больше арифметических вычислений и знания характеристической кривой для используемой пленки. При каждом выбранном напряжении выполняют однократное экспонирование ступенчатого клина. На каждой рентгенограмме измеряют оптические плотности для каждого элемента клина. Затем по характеристической кривой используемой пленки вычисляют экспозицию, которая дала бы заданную оптическую плотность для каждого элемента клина. Полученные значения экспозиции, толщины и напряжения наносят на графики, как и при выполнении первого способа.

Номограммы строятся для определенной пленки (с определенными усиливающими экранами) и фокусного расстояния F_n . Если

значение фокусного расстояния F отличается от F_n , то полученную по номограмме экспозицию X_n пересчитывают по формуле:

$$X = \frac{X_n F^2}{F_n^2} . \quad (12)$$

При использовании пленок и экранов не тех типов, для которых построена номограмма, считается, что экспозицию можно пересчитать с учетом коэффициентов усиления k (Табл. 8) по формуле:

$$X = \frac{k}{k_n} X_n , \quad (13)$$

где X_n – экспозиция для пленки и экрана соответствующих номограмме; k_n – коэффициент усиления для пленки по номограмме; k — коэффициент усиления для используемой пленки. Но так как значения коэффициентов усиления k рассчитываются для конкретных значений напряжений, энергий излучения и плотностей почернения, то легче и вернее построить новую номограмму экспозиций. Формулы (13) и (12) можно объединить в одну:

$$X = \frac{k \cdot F^2}{k_n \cdot F_n^2} X_n . \quad (14)$$

При контроле импульсными рентгеновскими аппаратами время экспозиции, фокусное расстояние, тип рентгеновской пленки и усиливающих экранов выбираются исходя из конкретных условий контроля и требований, предъявляемых к качеству контроля. При контроле железа, меди, титана и сплавов на их основе рекомендуется использовать рентгеновские пленки РТ-1, РМ-1МД, R5, R7, R8, F8, D7 с флуоресцентными и свинцовыми усиливающими экранами. Для аппарата ПИОН-2М, при использовании флуоресцентных усиливающих экранов рекомендуется фокусное расстояние 500-1000 мм. При использовании пленок со свинцовой фольгой рекомендуется фокусное расстояние 300-600 мм.

Для импульсных аппаратов также строятся номограммы экспозиций. Поскольку максимальное напряжение в импульсной трубке не регулируется и задается разрядником-обострителем во вторичной цепи высоковольтного импульсного трансформатора (рис. 16),

построить номограмму экспозиции для импульсного аппарата гораздо проще. Пример такой номограммы приведен на рис 26.

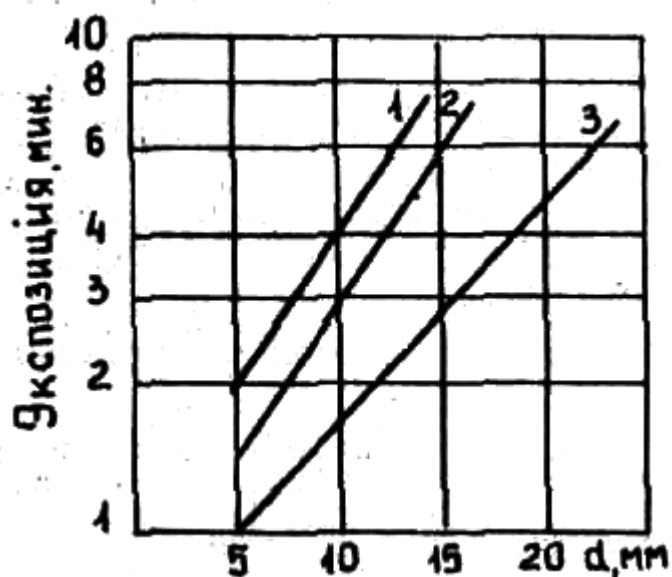


Рис. 26. Номограммы выбора времени экспозиции при радиографии стали импульсными аппаратами: 1 - МИРА-1Д, 2 — МИРА, 3 - МИРА-3Д.

Следует отметить, что на практике часто используют метод подбора экспозиции, используя электростатический дозиметр — электроскоп Лауритсена. В России этот дозиметр известен под марки ДП-22В (ДП-24) (диапазон измерений 0 - 50 Р), ДК-0,2 (0 - 200 мР), КИД-2 (0,005 - 1 Р). Плотность почернения пленки S сопоставима со значением экспозиционной дозы D . Поэтому можно заранее

составить для используемой пленки таблицу соответствия плотности почернения экспозиционной дозе и построить зависимость $S(D)$, по которой в последующем можно производить подбор экспозиции. Зная дозу, которая необходима для получения удовлетворительного качества снимков, дозиметр при контроле располагается за ОК и пленкой, его показания контролируются в промежутках между просвечиванием. При достижении необходимой дозы, рентгеновский аппарат выключают и производят обработку пленки. Этот метод можно использовать при РНК рентгеновскими аппаратами непрерывного действия.

В случае, если есть номограмма экспозиций для материала с известным линейным коэффициентом ослабления μ_0 , но необходимо произвести контроль изделия (и найти экспозицию) из другого материала, с толщиной d_M , для которого также известен коэффициент ослабления μ_M , то можно найти толщину эквивалентного

ослабления¹ d_0 . Зная толщину эквивалентного ослабления d_0 , по номограмме легко определить необходимую экспозицию. Материал, для которого построена номограмма экспозиции, называется *базовым* (табл. 10). Подсчет толщины эквивалентного поглощения можно определить по соотношению:

$$\frac{d_M \cdot \mu_M}{\mu_0} = d_0, \quad (15)$$

где d_M — толщина контролируемого материала; μ_0, μ_M — соответственно линейные коэффициенты ослабления базового и контролируемого материалов для эффективной энергии излучения $E_{эфф}$.

В качестве $E_{эфф}$ принимают энергию излучения, соответствующую $2/3 \cdot U_{max}$ для обычных аппаратов и $U_{max}/2$ для импульсных аппаратов. Значения U_{max} для различных материалов приведены в табл. 10.

Таблица 10

Значения напряжений U_{max} на рентгеновской трубке для базовых материалов

U_{max} , кВ	Толщина материалов, мм			
	Fe	Ti	Al	Mg
60	1	3	20	35
80	2	6	38	57
100	5	10	54	80
120	7	18	59	105
150	10	24	67	120
200	21	47	100	160
250	27	57	112	200
300	33	72	132	240

Значения линейных коэффициентов ослабления для различных материалов приведены в табл. 11.

1 При прохождении излучения через материал d_0 и d_M мощность дозы (интенсивность) будет одинаковой.

Таблица 11

Значения линейных коэффициентов ослабления μ (см⁻¹)

Энергия, МэВ	Материалы							
	Fe	Al	Cu	Ti	Ni	Mo	Pb	W
0,08	4,22	0,49	6,17	1,62	5,9	0,31	23,6	145
0,1	2,6	0,42	3,66	1,09	3,53	0,27	60,3	81,6
0,15	1,39	0,36	1,79	0,68	1,77	0,23	21,8	29
0,2	1,06	0,32	1,28	0,55	1,3	0,21	10,7	14,2
0,3	0,83	0,28	0,95	0,45	0,98	0,18	4,25	5,8
0,4	0,72	0,25	0,81	0,4	0,81	0,16	2,44	3,4
0,5	0,65	0,23	0,73	0,36	0,76	0,15	1,7	2,5
0,6	0,6	0,21	0,67	0,33	0,69	0,14	1,33	2
0,7	0,57	0,2	0,64	0,32	0,67	0,13	1,18	1,8
0,8	0,52	0,18	0,58	0,14	0,6	0,12	0,95	1,5
1	0,47	0,16	0,52	0,12	0,54	0,11	0,77	1,2
1,25	0,42	0,15	0,47	0,11	0,49	0,1	0,66	1,1

Толщину эквивалентного ослабления стали приблизительно можно найти, используя коэффициенты эквивалентности из табл. 12. Чтобы вычислить толщину эквивалентного ослабления стали, необходимо умножить толщину просвечиваемого материала на коэффициент эквивалентности, выбранный для используемого напряжения рентгеновской трубки или радионуклида.

Таблица 12

Значения коэффициентов эквивалентности $k_{\text{ЭКВ}}$

Металлы	Напряжение на трубке, кВ					Радионуклиды				
	50	100	150	200	400	Tm	Se	Ir	Cs	Co
Магний	0,03	0,06	0,12	0,18	0,22	0,16	0,18	0,22	0,23	0,23
Алюминий	0,05	0,08	0,16	0,25	0,32	0,29	0,32	0,34	0,34	0,34
Титан	0,35	0,37	0,42	0,50	0,54	0,52	0,54	0,56	0,57	0,57
Железо	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Медь	1,52	1,46	1,39	1,29	1,15	1,21	1,15	1,11	1,11	1,11
Никель	1,44	1,39	1,35	1,27	1,18	1,22	1,19	1,15	1,15	1,15
Молибден	4,51	4,42	3,79	2,65	1,62	2,14	1,82	1,31	1,29	1,26
Свинец	-	-	21,1	14,1	4,94	7,32	6,94	3,85	3,28	2,23
Вольфрам	-	-	27,8	18,6	6,75	10,6	9,53	4,96	4,21	3,21

Основными параметрами, выбираемыми при просвечивании гамма-лучами, являются: энергия излучения, активность источника, экспозиция, рентгеновская пленка, усиливающие экраны, фокусное расстояние.

Энергия излучения зависит от схемы распада и гамма-переходов возбужденного дочернего ядра. Спектр гамма-излучения может быть достаточно сложным, и состоять из нескольких линий с разными энергиями (рис. 10), кроме того всегда присутствует сопутствующее рентгеновское излучение. Энергия излучения влияет на проникающую способность и на мощность дозы как гамма-постоянная $\Gamma_{СИ}$.

Энергию излучения для заданного материала и толщины сварного соединения определяют путем выбора соответствующего изотопа по табл. 13. Пленку, усиливающие экраны и фокусные расстояния выбирают так же, как и при рентгеновском просвечивании.

Таблица 13

Толщины базовых материалов при гаммаграфировании, мм

Источник излучения	Материал			
	Fe	Ti	Al	Mg
Tm-170	до 4	до 8	до 50	до 80
Se-75	2-40	4-70	10-200	25-250
Ir-192	10-70	20-120	45-250	65-300
Cs-137	25-100	50-170	95-300	130-420
Co-60	35-200	100-340	190-550	280-820

Активность источника является важным параметром гамма-источника и влияет на мощность дозы. Связь между активностью и мощностью экспозиционной дозы для точечного изотропного радионуклидного источника можно записать как:

$$\dot{D}_X = A \cdot \Gamma_{СИ} / F^2, \quad (16)$$

где \dot{D}_X — мощность экспозиционной дозы; A — активность источника; $\Gamma_{СИ}$ — гамма-постоянная источника; F — расстояние от источника до точки регистрации.

Экспозиция при гамма-графировании зависит от мощности экспозиционной дозы источника. Экспозицию определяют, как и в слу-

чае рентгенографического контроля, по заранее составленным номограммам. Удобно пользоваться универсальными номограммами (рис. 27), позволяющими устанавливать время просвечивания для базовых материалов различными изотопами при различных фокусных расстояниях. Выбор времени просвечивания осуществляют следующим образом.

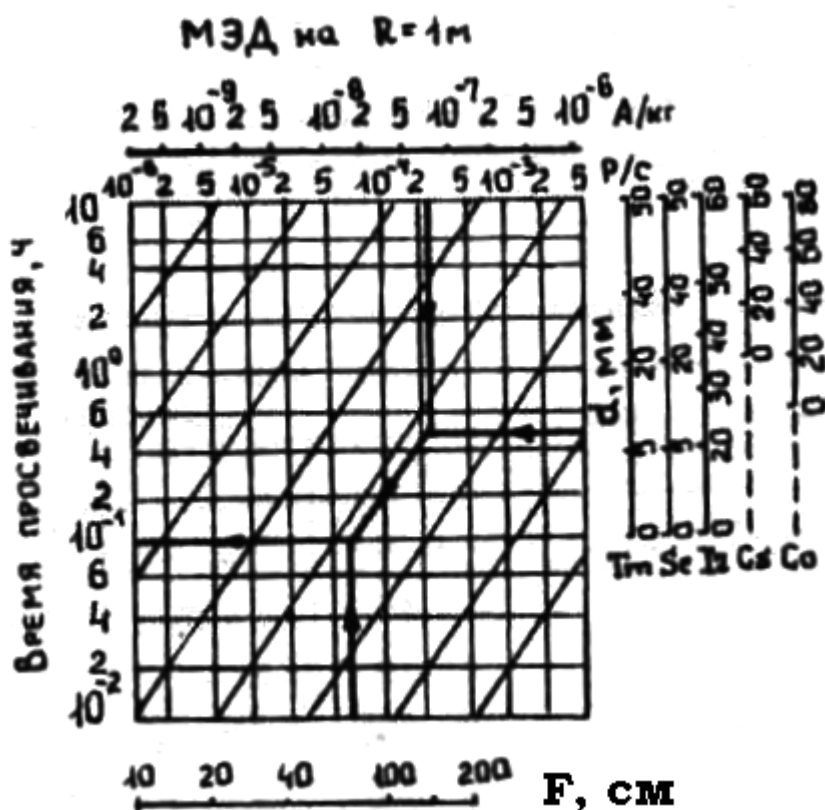


Рис. 27. Универсальная номограмма для определения времени экспозиции при гаммаграфировании стали с использованием пленки РТ-1

Для выбранного изотопа проводят горизонтальную линию через точку, соответствующую толщине контролируемого материала, до пересечения с вертикальной линией, определяющей мощность экспозиционной дозы (\dot{D}_x). Затем через найденную точку пересечения

проводят линию, параллельную диагоналям n , до пересечения с вертикальной линией, соответствующей выбранному фокусному расстоянию F , после чего по оси ординат определяют время просвечивания t .

В некоторых справочниках номограммы экспозиции для гаммаизлучения приводятся в единицах экспозиции, определенных как произведения активности на время. Эти таблицы составлены для

конкретных значений фокусного расстояния, плотности почернения, типа пленки, используемого экрана и изотопа.

При расчетах экспозиции необходимо учитывать снижение мощности дозы \dot{D} источников вследствие их радиоактивного распада. В техническом паспорте к источнику указываются мощность дозы и время измерения. Рассчитать мощность дозы \dot{D} на момент контроля можно по выражению:

$$\dot{D} = \dot{D}_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}, \quad (17)$$

где \dot{D}_0 – мощность дозы указанная в паспорте на источник; t – время прошедшее с даты измерения, указанной в паспорте источника, до момента контроля; $T_{1/2}$ – период полураспада используемого радионуклида. В табл. 14 приведены параметры радионуклидов, используемых в дефектоскопии.

Таблица 14

Радионуклид	Период полураспада, $T_{1/2}$	Энергия γ -квантов, кэВ	Гамма-постоянная $\Gamma_{си}$, $\frac{P \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мКи}}$
Кобальт ^{60}Co	5,27 лет	1332 и 1173	13,2
Цезий ^{137}Cs	29,6 лет	661,6	3,3
Иридий ^{192}Ir	74,4 дня	сложный спектр от 136 до 1360, при макс. 300-400	4,8
Селен ^{75}Se	120,4 дня	сложный спектр от 66 до 572, при макс. 120-280	2,03
Иттербий ^{169}Yb	32 дня	сложный спектр от 63 до 308, при макс. 63-198	1,25
Тулий ^{170}Tm	129 дней	52 и 84	0,025

При изменении фокусного расстояния и/или типа используемой пленки необходимо пересчитать время экспозиции для компенсации разницы их чувствительности. Для расчета новой

экспозиции при изменении фокусного расстояния и/или замене типа пленки можно воспользоваться тем же выражением, что для рентгенографического контроля (14). Коэффициенты усиления k пленок Kodak INDUSTREX, относительно пленки AA400 для разных типов источников приведены в табл. 15. Данные приведены для случая автоматической обработки в проявочной машине В2000 в течение 8 минут при температуре 26°C.

Таблица 15

Энергия	Тип пленки Kodak INDUSTREX					
	AA400	T200	MX125	M100	M	DR50
50-150 кВ	1	1,6	2,9	4,1	3,0	6,5
220 кВ	1	1,7	2,8	4,2	3,5	7,2
Ir^{192}	1	1,9	3,1	5,4	4,4	9,0
Co^{60}	1	1,9	3,3	6,3	5,1	10

4.3. Схемы просвечивания

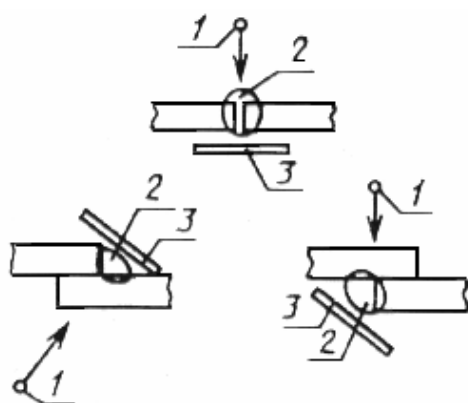


Рис. 28. 1 — источник излучения; 2 — контролируемый участок; 3 — кассета с пленкой.

Схемы просвечивания выбираются согласно конкретным условиям контроля. Для наиболее распространенных случаев даются готовые рекомендации [4]. В качестве примера на рис. 28 приведены схемы просвечивания стыковых и нахлесточных сварных соединений.

В процессе экспонирования ОК необходимо использовать эталоны чувствительности (индикатор качества изображения). Обычно эталон чувствительности помещается

рядом с контролируемым участком (на границе области контроля) со стороны источника излучения так, чтобы самая тонкая проволока или ступенька были ориентированы к внешнему краю пленки.

Если поверхность образца, обращенная к источнику излучения, недоступна (например при контроле труб), то эталон чувствительности может быть размещен со стороны пленки и помечен буквой F. В качестве индекса качества изображения, кроме определяемого по выражению (9), можно использовать номер самой тонкой проволоки или ступеньки, различимой на дефектограмме

4.4. Обработка пленок

После экспонирования пленки обрабатывают химическими растворами. Химическая обработка включает проявление (преобразование скрытого фотоизображения в видимое), промежуточную промывку водой от проявителя, фиксирование изображения (удаление из раствора остатков не восстановленного химического вещества для получения светлого и прозрачного изображения), окончательную промывку водой и сушку. Обычно время фотообработки составляет 0,5-1 ч при ручной обработке и около 15 минут в проявочном автомате.

Работа с фотопленками в промышленной радиографии должна проводиться в фотолаборатории при правильно выбранном освещении, при котором нет опасности засветить радиографическую пленку. Необходимо обратить внимание на светонепроницаемость помещения, особенно при устройстве передвижных фотолабораторий на месте проведения работ. Фотолаборатория должна регулярно проверяться на наличие просачивающегося света.

Для обеспечения удобной работы необходимо правильно выбрать источник освещения, неактивирующего фоточувствительные компоненты пленки (красный свет). Яркость освещения и направление излучения должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить удобство работы и при этом не было бы опасности засветить фоточувствительные материалы.

Составы проявителей и фиксажей радиографических пленок рекомендуются заводом-изготовителем. Некоторые крупные фирмы, например Kodak, выпускают для своих пленок уже готовые проявители и фиксажи в виде жидких концентратов и в порошке.

Для ручной обработки пленок Kodak выпускает проявитель INDUSTREX Manual Developer и фиксаж INDUSTREX Manual Fixer. Также выпускаются другие реактивы для обработки радиографических пленок. МАХ — стоп-ванна с индикатором, который используется после проявителя для прерывания процесса проявки. Раствор PHOTO-FLO 600 — предназначенный для снятия с пленки статического заряда, предотвращения скручивания пленки и оседания на ней пыли.

Составы химических реактивов для самостоятельного приготовления проявителей и закрепителей подробно описаны в специальной литературе [10].

Время проявки и фиксирования влияет на качество изображения радиографической пленки. Так, например, обработка в проявителе продолжительностью менее рекомендованного значения может привести к неравномерности проявки, а при превышении рекомендованного времени проявки приводит к сильному почернению пленки. При слишком большом времени фиксирования пленки ее оптическая плотность снижается. В табл. 16 приведены общие рекомендации по ручной обработке пленок Kodak INDUSTREX при температуре 20°C и регулярном перемешивании.

Таблица 16

Проявитель (INDUSTREX Manual Developer)	4 мин
Стоп-ванна (МАХ)	0,5 — 1 мин
Фиксаж (INDUSTREX Manual Fixer)	3 — 6 мин
Промывка (дист. вода)	10 — 30 мин
Ополаскивание (PHOTO-FLO 600)	30 сек

Обработка пленок может проводиться и при температурах отличных от 20°C. В табл. 17 приведены времена проявки в зависимости от температуры проявителя.

Если возникла необходимость обработки пленки при температуре около 24°C, необходимо чаще возобновлять раствор фиксажа. Пленка должна быть полностью зафиксирована для обеспечения

максимального задубления, а время промывки должно быть ограничено 15-ю минутами.

Таблица 17

Температура проявителя, °С	Время проявки, минуты	
	Норма	Максимум
18	5	10
19	4,5	9
20	4	8
21	3,5	7
22	3,25	6,5
24	2,5	5

Сушку пленок выполняют в сушильных шкафах в течение 15-20 мин с вентиляцией и подогревом воздуха до температуры не выше 35°С. При отсутствии сушильных шкафов пленки сушат в течение 2-4 ч в сухих лишенных пыли помещениях в подвешенном состоянии.

4.5. Расшифровка дефектограмм

Расшифровку дефектограмм выполняют в проходящем свете на негатоскопе — устройстве, в котором имеются закрытые рассеивающим или матовым стеклом осветительные лампы для создания равномерно рассеянного светового потока. При этом помещение для расшифровки затемняют, чтобы поверхность пленки не отражала падающий на нее свет. Негатоскопы обеспечивают регулирование яркости освещенного поля и его размеров.

Расшифровку снимков и оценку качества контролируемого сварного соединения производят операторы — расшифровщики, которые по выполненным дефектограммам дают заключение о наличии дефектов.

Так как рентгеновская пленка является детектором с высоким уровнем собственных шумов, вызванных неравномерностью полива эмульсии, некачественным проявлением и т.д., расшифровщики

должны уметь отличать дефекты пленки от дефектов изделия. В сомнительных случаях проводят повторное просвечивание или применяют зарядку кассет двумя пленками.

В разных отраслях промышленности существуют собственные правила и нормы, регламентирующие как уровень дефектности сварных соединений, так и требования к качеству выполнения самой дефектограммы. В общем виде снимок должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) на дефектограмме должны быть видны весь сварной шов с усилением и околошовная зона, ширина которой определяется правилами контроля;
- 2) на снимке должны быть отчетливо видны маскировочные знаки и эталоны чувствительности;
- 3) на снимке должны отсутствовать пятка, царапины, отпечатки пальцев, подтеки, белый налет от плохой промывки и другие дефекты пленки и обработки.

При контроле сварных соединений на дефектограммах выявляют следующие дефекты:

- 1) трещины продольные и поперечные в наплавленном и основном металле, направление которых совпадает с направлением просвечивания в диапазоне углов от 0 до 10-12°;
- 2) непровары сплошные и прерывистые;
- 3) вольфрамовые и шлаковые включения;
- 4) поры — газовые включения;
- 5) подрезы, проплавы, прожоги.

Расшифровка пленок при гаммаграфировании производится так же, как и при рентгенографировании.

5. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТОСКОПАМИ

Основные принципы дозиметрии и радиационной безопасности подробно рассмотрены в учебном пособии «Практикум по ядерной физике» [5]. Поэтому здесь приведены основные требования

радиационной безопасности при проведении работ по рентгеновской и гамма-дефектоскопии.

К работе с рентгеновскими аппаратами допускаются лица не моложе 18 лет, не имеющие медицинских противопоказаний для работы с ионизирующим излучением, при наличии соответствующей квалификации, прошедшие инструктаж и проверку знаний правил безопасности при работе с источниками рентгеновского излучения и электроустановками с напряжением свыше 1000 В не ниже II группы электробезопасности. Все лица должны быть отнесены к группе А (персонал), в том числе временно привлекаемые.

Измерение мощности эквивалентной дозы рентгеновского излучения от импульсных рентгеновских аппаратов требует применения дозиметров с быстродействующим детектором.

Дозиметры с газоразрядными детекторами не пригодны, т.к. у них большое время восстановления и они детектируют вспышку рентгеновского излучения как один квант. Также не все сцинтилляционные детекторы пригодны для этой задачи, поскольку время высвечивания у неорганических сцинтилляторов от 50 нс до 1 мкс.

Принцип действия быстродействующего дозиметра основан на использовании органического (пластмассового) сцинтиллятора и быстродействующего фотоэлектрического умножителя.

Быстродействующие приборы, такие как ДКС-АТ1123, ДКС-96 с блоком детектирования БДКС-96 позволяют проводить измерения параметров импульсного наносекундного рентгеновского излучения.

Например, дозиметр рентгеновского и гамма-излучения ДКС-АТ1123 измеряет среднюю мощность эквивалентной дозы импульсного излучения при мощности дозы в импульсе до 1,3 Зв/с и длительностью импульса не менее 10 нс в диапазоне от 1 мкЗв/ч до 30 Зв/ч, эквивалентную дозу в диапазоне от 50 нЗв до 10 Зв с погрешностью $\pm 30\%$. Диапазон энергий регистрируемого рентгеновского и гамма излучений от 15 кэВ до 10 МэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 2601-84 Сварка металлов. Термины и определения основных понятий, 1995.
2. ГОСТ 3242-79 Соединения сварные. Методы контроля качества, 1988.
3. ГОСТ 30242-97 Дефекты соединений при сварке металлов плавлением. Классификация, обозначения и определения, 2001.
4. ГОСТ 7512-82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод, 2002.
5. Практикум по ядерной физике. Методическое пособие/ Под ред. Э.К. Садыкова. КГУ. Казань, 1997.
6. Волченко В.Н. Контроль качества сварных конструкций. П.: Машиностроение, 1986. 152 с.
7. Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А. Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
8. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ Под ред. В.В.Клюева. М.: Машиностроение, 1995.
9. Методы дефектоскопии сварных соединений/ Под ред. В.Г. Щербинского. М.; Машиностроение, 1987. 360 с.
10. Бунимович Д.З., Фомин А.В. Справочник фотографа. М.: Легкая индустрия, 1970. 280 с.