

С.В. Румянцев
А.С. Штань
Ю.Ф. Попов

СПРАВОЧНИК

**РЕНТГЕНО-
И
ГАММА-
ДЕФЕКТОСКОПИСТА**

ХИ

СПРАВОЧНИК

С. В. Румянцев, А. С. Штань, Ю. Ф. Попов. **Справочник рентгено- и гамма-дефектоскописта.** М., Атомиздат, 1969, 276 стр.

В настоящем справочнике рассматриваются методы и средства дефектоскопического контроля качества материалов и изделий с использованием ионизирующих излучений, т.е. методы и средства радиационной дефектоскопии. В справочнике кратко изложены физические основы радиационной дефектоскопии, даны основные понятия и терминология, приводятся характеристики источников ионизирующих излучений и других средств дефектоскопического контроля, данные по области их применения и методические указания по проведению дефектоскопического контроля с использованием ионизирующих излучений. Основное внимание при составлении справочника уделено радиографическим методам радиационной дефектоскопии, однако наряду с этим приводятся сведения и по другим методам радиационной дефектоскопии. Рассмотрены вопросы организации контроля на предприятии, устройства и оснащения дефектоскопических лабораторий, а также вопросы техники безопасности.

Справочник будет полезен работникам дефектоскопических лабораторий промышленных предприятий, связанных с неразрушающим контролем сварки, пайки, литья и других технологических процессов, а также другим специалистам, работающим в области контроля качества материалов, деталей и готовых изделий при решении вопросов, связанных с выбором методов и средств неразрушающего контроля и соответствующего оборудования, при организации и оснащении дефектоскопических лабораторий.

Табл. 38, рис. 74, библиогр. — 34 наименования.

Глава 1. Методы неразрушающего контроля	5
§ 1. Разделы дефектоскопии	5
§ 2. Методы радиационной дефектоскопии	6
Глава 2. Физика ионизирующих излучений	14
§ 1. Общие понятия	14
§ 2. Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом	21
§ 3. Регистрация ионизирующих излучений	30
Глава 3. Источники ионизирующих излучений	35
§ 1. Радиоактивные источники излучения	39
§ 2. Рентгеновские и гамма-аппараты, ускорители и бетатроны	46
1. Рентгеновские аппараты	46
2. Линейные ускорители и бетатроны	65
3. Гамма-аппараты	73
Глава 4. Рентгеновские пленки и усиливающие экраны	91
§ 1. Рентгеновские пленки	91
§ 2. Фотообработка и хранение рентгеновской пленки	102
§ 3. Металлические фольги и флуоресцирующие экраны	116
Глава 5. Радиографический метод радиационной дефектоскопии	124
§ 1. Радиографическая чувствительность	125
§ 2. Организация и методика радиографического контроля	141
§ 3. Режимы радиографирования	164
§ 4. Расшифровка радиографических изображений	174
§ 5. Специальные методы радиографии	188
Глава 6. Ксерорадиографический метод радиационной дефектоскопии	194
Глава 7. Визуальные методы радиационной дефектоскопии (флуороскопия)	204

Глава 8. Радиометрические методы радиационной дефектоскопии	218
§ 1. Ионизационный метод контроля	218
§ 2. Радиационная толщинометрия	224
Глава 9. Лаборатории и техника безопасности в радиационной дефектоскопии	248
§ 1. Дефектоскопические лаборатории и лабораторное оборудование	248
§ 2. Техника безопасности в радиационной дефектоскопии	258
Приложения	264
Литература	274

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

§ 1. РАЗДЕЛЫ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Дефектоскопия — это совокупность физико-химических методов контроля качества материалов и изделий. В связи с развитием современной техники и неуклонным повышением требований, предъявляемых к качеству и надежности выпускаемой продукции, возрастает роль дефектоскопии в промышленности. В настоящее время дефектоскопия сформировалась в самостоятельный раздел технической науки, которая занимается разработкой и внедрением новых и совершенствованием существующих методов и средств контроля.

Наиболее широкое распространение в промышленности получили методы контроля качества материалов и изделий без их разрушения (неразрушающий контроль). Такие методы обеспечивают стопроцентный контроль материалов и изделий, во многих случаях поддаются автоматизации и позволяют существенно повысить качество готовой продукции.

В зависимости от физических принципов дефектоскопия делится на несколько разделов, основными из которых являются: радиационная, ультразвуковая, магнитно-порошковая, электромагнитная и люминесцентная (цветная) дефектоскопия. Каждый раздел дефектоскопии объединяет несколько методов неразрушающего контроля, различающихся по используемой аппаратуре и схеме проведения контроля.

Ни один из этих методов не является универсальным и не в состоянии удовлетворить всем требованиям. Однако каждый метод дефектоскопии имеет свою область применения, в пределах которой он является наиболее эффективным. Выбор того или иного метода неразрушающего контроля определяется конкретными требованиями практики и зависит от конструкции и ма-

териала контролируемого объекта, от условий проведения контроля, а также от характеристик объекта, которые необходимо определить при контроле (вид дефекта или отклонение параметров объекта от заданных техническими условиями).

В табл. 1 и 2 приводятся области применения основных методов дефектоскопии для контроля качества изделий и материалов. Данными таблицами рекомендуется пользоваться для предварительного выбора и приближенной оценки возможностей метода контроля конкретного объекта.

Таблицы обобщают обширный экспериментальный материал по применению методов неразрушающего контроля и основаны на предположении, что выбранный метод контроля применим для обнаружения дефектов при наличии: 1) соответствующего оборудования; 2) квалифицированного персонала; 3) соответствующих условий проведения контроля; 4) строгого соблюдения производственных инструкций.

Эти таблицы помогают определять общие возможности методов неразрушающего контроля и соответствующего оборудования.

В настоящем справочнике рассматривается только радиационная дефектоскопия, причем особое внимание уделено тем методам радиационной дефектоскопии, которые нашли наиболее широкое применение в промышленности.

§ 2. МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Радиационная дефектоскопия — это определение качества (или параметров) определенных материалов и изделий с помощью ионизирующих излучений. Основными направлениями радиационной дефектоскопии, широко применяемыми в промышленности, являются: рентгенодефектоскопия, гамма-дефектоскопия и радиационная толщинометрия. В каждом из этих направлений радиационной дефектоскопии в зависимости от применяемых источников ионизирующих излучений и способов регистрации излучения имеется несколько методов проведения неразрушающего контроля. Различие между рентгеновской и гамма-дефектоскопией заключается в используемых источниках ионизирующих излучений, однако ввиду общности способов регистрации излуче-

ния и целей испытаний они имеют общую методику и технологию проведения контроля в производственных условиях.

1. Рентгенодефектоскопия — установление наличия внутренних дефектов в материалах и изделиях, их местонахождения, формы и размеров при просвечивании рентгеновским излучением. При прохождении рентгеновского излучения сквозь участки изделия разной плотности и протяженности в направлении просвечивания интенсивность излучения ослабляется неодинаково. Измеряя интенсивность рентгеновского излучения после прохождения объекта, можно получить картину внутреннего строения контролируемого объекта. На основании опытных данных для каждого материала устанавливают оптимальную толщину просвечиваемого слоя в зависимости от напряжения на аноде рентгеновской трубки, фокусного расстояния и величины анодного тока. По способам регистрации рентгеновского излучения различают методы рентгеновской дефектоскопии: рентгенографический, ксерорадиографический, рентгеноскопический и радиометрический (ионизационный).

Рентгенография. При рентгенографическом методе контроля в качестве детектора рентгеновского излучения применяют рентгеновскую пленку, которую помещают за просвечиваемым объектом по ходу излучения. Плотность почернения рентгеновской пленки зависит от интенсивности рентгеновского излучения: она меньше на участках, перекрытых более плотными (или более протяженными в направлении просвечивания) местами контролируемого объекта, вследствие чего выявляется картина внутреннего строения контролируемого объекта. Для каждого материала в зависимости от толщины просвечиваемого слоя, напряжения на аноде рентгеновской трубки, фокусного расстояния, величины анодного тока и типа применяемой рентгеновской пленки на основании экспериментальных данных строят номограммы для определения времени просвечивания (номограммы экспозиций). Рентгенографический метод контроля обладает низкой производительностью, однако широко применяется в промышленности, так как обладает высокой чувствительностью и простой схемой проведения контроля.

Ксерография (ксерорадиография). При ксерорадиографическом методе контроля детектором излучения

является фотопроводниковая (обычно селеновая) заряженная пластинка, чувствительная к ионизирующему излучению. Под действием рентгеновского излучения селен становится проводником и в результате этого происходит утечка заряда с поверхности пластинки. Чем больше интенсивность воздействующего на пластинку излучения, тем быстрее эта пластинка разряжается. При просвечивании контролируемого объекта, помещенного над ксерорадиографической пластинкой, на ней образуется скрытое электростатическое изображение внутреннего строения объекта. Скрытое электростатическое изображение проявляют, нанося на пластинку мелкий порошок, частицы которого притягиваются к пластинке оставшимся на ней электрическим зарядом.

Ксерорадиографический метод контроля имеет высокую чувствительность и по сравнению с рентгенографическим методом контроля — более высокую производительность. Тем не менее применение его в промышленности до настоящего времени ограничено вследствие высокой стоимости и сложности изготовления ксерографических пластин.

Рентгеноскопия (флуороскопия или видение дефектов в материалах). В рентгеноскопическом методе контроля детектором ионизирующих излучений является флуороскопический рентгеновский экран. Флуороскопический экран состоит из специального стекла, покрытого тонким слоем флуоресцирующего под действием ионизирующих излучений вещества. При просвечивании контролируемого объекта на флуороскопическом экране происходит непосредственное преобразование рентгеновского изображения объекта в видимое изображение, которое можно рассматривать либо непосредственно на экране, либо передавать его при помощи телевизионной установки на безопасное расстояние. Несмотря на высокую производительность рентгеноскопического метода контроля, применение его в промышленности ограничено вследствие низкой чувствительности к обнаружению дефектов. Этот метод используется главным образом при контроле малоответственных узлов и деталей или заготовок между различными технологическими процессами.

Радиометрический (ионизационный) метод контроля. В отличие от рентгенографического и рентгеноскопического методов контроля, при которых контролируемый

объект просвечивается широким пучком излучения, при радиометрическом методе контроля объект просвечивают узким пучком излучения.

Узкий пучок излучения, полученный с помощью коллиматора, перемещается по контролируемому объекту, проходя последовательно все его участки. Прошедшее через объект излучение регистрируется счетчиком излучения и преобразуется в электрический сигнал — ток или напряжение. Амплитуда электрического сигнала пропорциональна интенсивности рентгеновского излучения. Путем сравнения электрических сигналов на выходе электроинного устройства, соответствующих различным участкам контролируемого объекта, делается заключение о качестве изделия.

Радиометрический метод контроля позволяет быстро получить информацию о качестве контролируемого объекта и может быть легко автоматизирован. Это обеспечивает высокую производительность метода, особенно при контроле материалов большой толщины, когда чувствительность метода оказывается довольно высокой. По абсолютной величине поперечные размеры выявляемого дефекта сравнимы с поперечным сечением пучка ионизирующего излучения, т. е. с диаметром отверстия коллиматора или детектора излучения.

2. Гамма-дефектоскопия — метод обнаружения дефектов в материалах и изделиях путем просвечивания их γ -излучением радиоактивных изотопов. γ -Излучение, так же как и рентгеновское излучение, в различной степени ослабляется при прохождении сквозь участки изделия разной плотности и протяженности в направлении просвечивания. Источник γ -излучения устанавливают на определенном расстоянии от контролируемого объекта, с другой стороны которого располагают детектор, регистрирующий прошедшее излучение. Интенсивность излучения, прошедшего через различные участки просвечиваемого изделия, будет различной в зависимости от состава, плотности и толщины соответствующего участка. Регистрируя полученное распределение интенсивности излучения, определяют картину внутреннего строения контролируемого объекта.

На основе экспериментальных данных определяют область применения радиоактивных изотопов, т. е. толщину и плотность просвечиваемого материала. Активность радиоактивного источника излучения выбирают в

соответствии с чувствительностью детектора излучения, толщины и вида просвечиваемого материала.

Существуют три метода гамма-дефектоскопии, различающиеся по способам регистрации γ -излучения: гамма-графия, радиометрический метод и флуороскопический (визуальный) метод. Все три метода аналогичны соответствующим методам рентгенодефектоскопии, вследствие чего рентгеновская и гамма-дефектоскопия не имеют принципиальных различий и в промышленности взаимно дополняют друг друга.

Гаммаграфия. Метод заключается в получении картины внутреннего строения контролируемого объекта путем просвечивания объекта γ -излучением радиоактивных изотопов и регистрации полученного изображения на рентгеновскую пленку. На основе опытных данных определяют область применения радиоактивных источников излучения в зависимости от плотности материала и толщины просвечиваемого слоя и строят номограммы, по которым в зависимости от характеристик контролируемого объекта, активности выбранного источника излучения и фокусного расстояния определяют время просвечивания.

Чувствительность гаммаграфического метода контроля несколько ниже по сравнению с чувствительностью рентгенографического метода. Тем не менее широкое применение гаммаграфии в промышленности обусловлено отчасти возможностью проведения контроля в условиях, когда рентгенографический контроль затруднен или вообще невозможен, отчасти экономическим эффектом, получаемым за счет применения радиоактивных изотопов.

Ввиду большой общности гаммаграфического и рентгенографического методов контроля их объединяют под общим названием — радиографические методы контроля.

Визуальная гамма-дефектоскопия (видение дефектов в материалах) — метод контроля, при котором исследуемый объект просвечивается γ -излучением радиоактивного источника большой активности. Детектором излучения является либо флуороскопический экран, либо кристалл сцинтиллятора. Получаемое изображение контролируемого объекта рассматривают непосредственно на экране или предварительно передают с помощью телевизионной установки на безопасное расстояние.

Чувствительность визуальной гамма-дефектоскопии ниже чувствительности визуальной рентгенодефектоскопии вследствие того, что проекция (фокусное пятно) радиоактивного источника излучения больше фокусного пятна современных рентгеновских трубок.

Радиометрический (ионизационный) метод контроля. В этом методе контролируемый объект просвечивают по участкам узким пучком γ -излучения, который перемещается по объекту. Прошедшее излучение регистрируется счетчиком излучения и преобразуется в электрический сигнал, амплитуда которого пропорциональна интенсивности γ -излучения.

Сравнивая сигналы на выходе электронного устройства, соответствующие различным участкам контролируемого объекта, делают заключение о качестве изделия. Ионизационный метод гамма-дефектоскопии обладает высокой производительностью и чувствительностью, однако, как и в случае ионизационной рентгенодефектоскопии, он оказывается наиболее эффективным при контроле материалов большой толщины. Кроме того, трудности, возникающие при расшифровке получаемой информации, сдерживают широкое внедрение этого метода в промышленность.

3. Нейтронная дефектоскопия — метод контроля качества материалов и изделий с помощью нейтронного излучения. Применение нейтронов позволяет просвечивать большие толщины тяжелых материалов (свинец, вольфрам, уран), контролировать качество легких материалов типа пластмасс, заэкранированных другими материалами, обнаруживать включения материалов с большим сечением поглощения нейтронов и т. п.

Как и в гамма-дефектоскопии, при нейтронной дефектоскопии возможны радиографический и радиометрический способы контроля.

При нейтронной радиографии применяют экраны-конверторы, преобразующие нейтроны в другие виды излучения (α -, β -, электромагнитное), к которым фотография чувствительность рентгеновской пленки больше, чем к нейтронам. В качестве экранов-конверторов применяют люминесцентные усиливающие экраны из $ZnS(Ag)$ с добавками В или Li и металлические экраны из Gd, Dy, Rh, In и др.

В качестве источников нейтронов можно использовать ядерные реакторы, подкритические сборки (ней-

тронные размножители), ускорители заряженных частиц (нейтронные генераторы, циклотроны и т. п.) и изотопные источники нейтронов. Формирование пучков нейтронов с требуемыми для контроля параметрами осуществляется при помощи замедляющих устройств и систем коллимации.

Радиографические снимки, получаемые при помощи тепловых нейтронов, по информационной способности близки к снимкам, получаемым при использовании рентгеновского излучения.

Метод нейтронной дефектоскопии находится в стадии разработки и применим пока лишь в лабораторных условиях.

4. Радиационная толщинометрия — метод определения толщины деталей, толщины теплоизоляционных антикоррозионных и других покрытий готовых изделий с применением рентгеновского, γ - и β -излучений.

В ряде технологических процессов возникает необходимость измерить не абсолютную величину, а отклонение определенного параметра от заданной величины, которое можно рассматривать как дефект данного технологического процесса. В этом случае толщинометрия выступает в роли дефектоскопии. Характерная черта радиационной толщинометрии — отсутствие контакта между измеряемым объектом и измерительной аппаратурой, благодаря чему методы радиационной толщинометрии находят широкое применение для автоматического контроля и управления автоматизированным производственным процессом.

В радиационной толщинометрии можно выделить два направления: в одном для измерения толщины применяют рентгеновское и γ -излучение — рентгено- и гамма-толщинометрию; в другом для тех же целей применяют β -излучение — бета-толщинометрию.

Рентгено- и гамма-толщинометрия — определение толщины изделий, материалов с применением рентгеновского и γ -излучения. Интенсивность излучения, прошедшего через материал, является обратной функцией его весовой толщины, т. е. веса материала, приходящегося на единицу площади. Чем меньше энергия квантов излучения, тем сильнее оно ослабляется в материале и, следовательно, тем меньшие толщины поддаются измерению. Сравнительная легкость получения рентгеновского излучения с малой энергией квантов позволяет значи-

тельно расширить диапазон измеряемых толщин в сторону их уменьшения. Так, например, рентгеновское излучение, генерируемое при напряжении 15—150 кВ, пригодно для измерения толщины материалов от 25 мкм для алюминия до 25 мм для стали. Однако применение рентгеновского излучения в толщинометрии имеет свои недостатки. Основной проблемой, возникающей при использовании рентгеновской трубки в качестве источника излучения, является зависимость этого излучения от ускоряющего напряжения и тока трубки. Небольшие изменения этих параметров значительно влияют на интенсивность и спектр излучения и вызывают колебания показаний регистрирующего прибора.

Применение радиоактивных источников γ -излучения позволило разрешить эту проблему. Источники γ -излучения имеют определенный спектр, определяемый схемой распада, и интенсивность их изменяется по известному закону, в соответствии с которым в регистрирующий прибор вводят необходимую компенсацию.

Бета-толщинометрия — определение толщины материалов и покрытий методом пропускания или отражения β -излучения. Применение β -источников вследствие невысокой проникающей способности β -излучения практически ограничивается измерением толщин материалов и покрытий, не превышающих 1 г/см² в установках с использованием пропускания β -излучения (и меньше в установках с использованием отражения β -излучения). Нижний предел измеряемых толщин определяется еще заметным ослаблением β -излучения и равняется ~1,5 мг/см² для алюминия и ~12 мг/см² для стали, что примерно соответствует толщинам 5 и 15 мкм соответственно. Для измерения более малых толщин и поверхностных плотностей в настоящее время разрабатывают толщинометры с использованием источников α -излучения.

§ 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ [2—5, 10]

Изотопы — разновидности одного и того же химического элемента, атомы которого имеют одинаковый порядковый номер Z (число протонов в ядре) и различные массовые числа A (число протонов и нейтронов в ядре).

Изобары — различные химические элементы, атомы которых имеют одинаковое массовое число A и различные порядковые номера Z .

Изомеры — химические элементы, атомы которых имеют одинаковый порядковый номер Z , одинаковое массовое число A , но различные радиоактивные свойства: энергию излучения, период полураспада.

Изотоны — химические элементы, атомы которых имеют одинаковое число нейтронов в ядре ($N=A-Z$) и разные массовые числа A .

Квант (фотон) — порция электромагнитного излучения, несущая энергию $E=h\nu$, где h — постоянная Планка ($h=6,625 \cdot 10^{-27}$ эрг·сек); ν — частота электромагнитного излучения, сек $^{-1}$.

Длина волны электромагнитного излучения $\lambda=c/\nu$, где c — скорость распространения электромагнитного излучения, $c=2,997 \cdot 10^{10}$ см/сек.

На рис. 1 изображена шкала различных электромагнитных излучений и номограмма перевода длины волны (частоты) излучения в энергию фотона.

Радиоактивный распад — превращение ядер атомов с последующим изменением их физических и химических свойств, сопровождающееся ионизирующим излучением. Существует несколько видов радиоактивного распада.

Альфа-распад — радиоактивный распад, при котором распадающееся ядро испускает α -частицу — ядро гелия с порядковым номером $Z=2$ и массовым числом $A=$

4 (${}^4\text{He}$). Характерен для естественно-радиоактивных элементов с большим Z .

Бета-распад — радиоактивный распад, при котором распадающееся ядро испускает β -частицу — электрон и

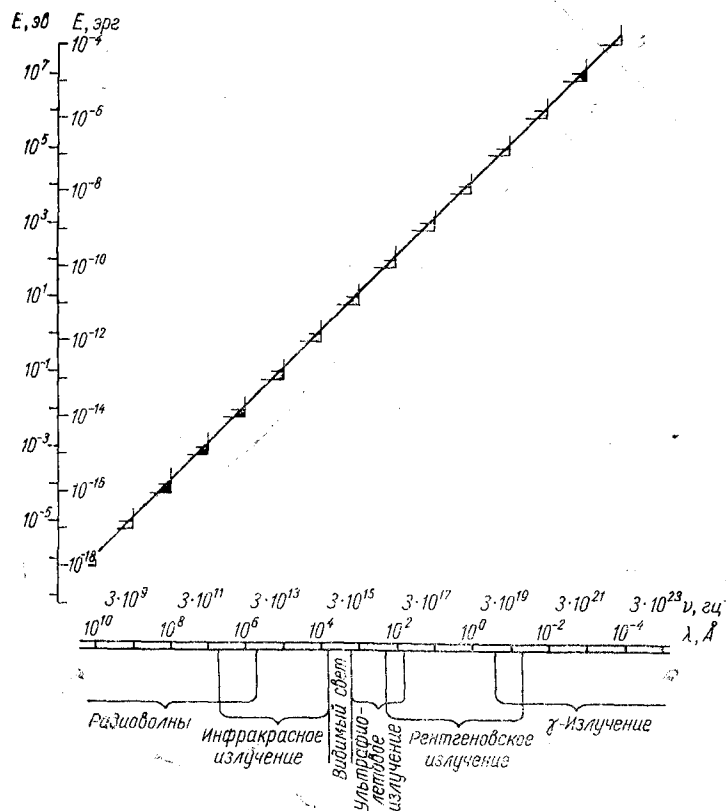


Рис. 1. Шкала различных электромагнитных излучений и номограмма перевода длины волны (частоты) излучения в энергию фотона, выраженную в эргах или электронвольтах ($1 \text{ эв} = 1,602 \cdot 10^{-12}$ эрг).

antineutrino. Порядковый номер Z ядра увеличивается на единицу, массовое число A практически не изменяется. Характерен как для естественно-радиоактивных, так и для искусственно-радиоактивных изотопов. Спектр β -излучения непрерывный.

Позитронный распад — радиоактивный распад, при котором распадающееся ядро испускает позитрон, равный по массе электрону и несущий единичный положительный заряд, и нейтрино. После испускания позитрона порядковый номер Z ядра уменьшается на единицу, массовое число A практически не меняется. Позитронный распад наблюдается у некоторых искусственно-радиоактивных изотопов.

K-захват — радиоактивный распад, при котором ядро атома захватывает один из электронов этого атома, обычно с внутренней K -оболочки. Порядковый номер Z ядра уменьшается на единицу, массовое число A практически не изменяется. На освободившееся место переходит электрон с более высокой оболочки, при этом испускается квант электромагнитного излучения.

Измерный переход — радиоактивный распад, при котором ядро из возбужденного состояния переходит в основное, сопровождающийся испусканием кванта γ -излучения. Иногда кроме γ -излучения испускаются электроны или позитроны.

Закон радиоактивного распада — уравнение, описывающее количественное изменение радиоактивного вещества со временем и имеющее вид

$$dN = -\lambda N dt,$$

где N — число радиоактивных ядер; dN — число ядер, распадающихся за период времени dt ; λ — постоянная распада данного изотопа.

Это дифференциальное уравнение имеет решение

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N — число оставшихся ядер спустя время t , N_0 — число радиоактивных ядер в начальный момент времени $t=0$.

Период полураспада T — время, необходимое для распада половины имеющихся радиоактивных ядер,

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} = e^{-\lambda T}; \quad T = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Периоды полураспада различных изотопов имеют значения от $<10^{-10}$ сек до $>10^{10}$ лет.

Активность радиоактивного вещества — скорость распада радиоактивных ядер, есть несколько единиц, характеризующих активность радиоактивного изотопа.

1. **Кюри** — активность такого количества радиоактивного вещества, в котором происходит $3,700 \cdot 10^{10}$ распада за 1 сек. Пользуются также единицами 1 *мкюри* = 10^{-3} *кюри* и 1 *мккюри* = 10^{-6} *кюри*.

2. **Гамма-эквивалент радия** — величина, служащая для сравнения радиоактивных изотопов по ионизирующему действию их γ -излучения. Количества различных радиоактивных изотопов, создающие при тождественных условиях измерения одинаковую мощность экспозиционной дозы, имеют одинаковый гамма-эквивалент.

Единицей гамма-эквивалента радия (ГОСТ 8848—63) является миллиграмм-эквивалент радия (*мг-экв Ra*). 1 *мг-экв Ra* — это гамма-эквивалент радиоактивного изотопа, γ -излучение которого при данной фильтрации и тождественных условиях измерения создает такую же мощность экспозиционной дозы, как γ -излучение 1 *мг* радия государственного эталона радия при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм. Единица *мг-экв Ra* не установлена стандартом, однако широко используется на практике. Применяется также единица грамм-эквивалент радия (*г-экв Ra*), 1 *мг-экв Ra* = 10^{-3} *г-экв Ra*.

Точечный источник в 1 *мг Ra* в равновесии с основными дочерними продуктами распада при платиновом фильтре 0,5 мм создает на расстоянии 1 см мощность экспозиционной дозы 8,4 *р/ч*. Эта величина называется нормализационной гамма-постоянной радия K_γ .

Удельная активность радиоактивного вещества — активность единицы веса радиоактивного вещества (*кюри/г*) или (*мккюри/г*).

Гамма-постоянная радиоактивного изотопа (ионизационная постоянная) — характеризует мощность дозы, создаваемую γ -излучением изотопа, приходящуюся на единицу активности этого изотопа, имеет размерность $\text{р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мкюри})$. Вместе с такими величинами, как активность, период полураспада, энергия излучения, гамма-постоянная помогает оценить изотоп с точки зрения радиографического использования.

Ионизирующие излучения — любые излучения, взаимодействие которых с веществом приводит к образованию электрических зарядов разных знаков.

Квантовое излучение — электромагнитное ионизирующее излучение, возникающее в результате внутриатомных и ядерных процессов.

Тормозное излучение — квантовое излучение с непрерывным спектром, возникающее при изменении скорости движения заряженных частиц в результате взаимодействия со средой.

Характеристическое излучение — квантовое излучение с дискретным спектром, возникающее при изменении энергетического состояния атома. Длина волны ха-

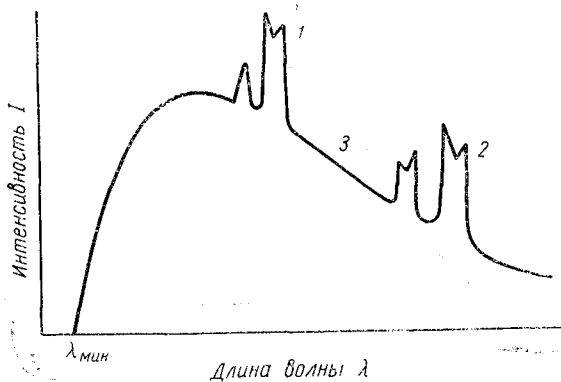


Рис. 2. Полный спектр рентгеновского излучения: 1 — K-серия и 2 — L-серия характеристического излучения; 3 — непрерывный спектр тормозного излучения.

рактеристического излучения зависит от атомного номера химического элемента Z и уменьшается по мере возрастания Z . Эта зависимость известна как закон Мозли.

Рентгеновское излучение — тормозное и характеристическое излучение, примерный диапазон энергии квантов которого от 1 кэВ до 1 МэВ, что соответствует интервалу длин волн от 10^{-8} см до 10^{-11} см. Рентгеновское излучение получают в рентгеновской трубке, в которой ускоренные электроны тормозятся в материале анода трубки.

Спектр рентгеновского излучения (рис. 2) — сплошная кривая, соответствующая спектру тормозного излучения электронов, с налагающимися на нее отдельными линиями интенсивности, соответствующими дискретному спектру характеристического излучения материала анода.

Гамма-излучение — квантовое излучение атомных ядер, возникающее при радиоактивном распаде элемен-

тов. Спектр γ -излучения дискретный, а его интервал длин волн по сравнению с рентгеновским излучением несколько сдвинут в сторону более коротких волн.

Бета-излучение — ионизирующее излучение, состоящее из электронов и возникающее при радиоактивном распаде элементов. Так как электроны тормозятся в материале источника, то β -излучение сопровождается тормозным излучением.

Моноэнергетическое излучение (однородное излучение) — ионизирующее излучение, состоящее из квантов одинаковой энергии или частиц одного вида с одинаковой кинетической энергией.

Немоноэнергетическое излучение (неоднородное излучение) — ионизирующее излучение, состоящее из квантов различной энергии или частиц одного вида с разной кинетической энергией.

Смешанное излучение — ионизирующее излучение, состоящее из частиц различного вида или из частиц и квантов.

Направленное излучение — ионизирующее излучение с выделенным направлением распространения.

Первичное излучение — ионизирующее излучение, которое в рассматриваемом процессе взаимодействия является или принимается исходным.

Вторичное излучение — ионизирующее излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного излучения с рассматриваемой средой.

Поле излучения — пространственно-временное распределение ионизирующего излучения в рассматриваемом объеме.

Поток квантов излучения — число квантов излучения, проникающих в единицу времени сквозь данную поверхность.

Плотность потока квантов излучения — рассчитанное на единицу площади поперечного сечения элементарной сферы число квантов излучения, проникающих в единицу времени в объем этой сферы.

Предельно допустимая плотность потока квантов излучения — максимальное значение плотности потока квантов излучения, установленное соответствующими правилами радиационной безопасности.

Поток энергии излучения — энергия ионизирующего излучения, проникающего в единицу времени сквозь данную поверхность.

Интенсивность излучения — энергия ионизирующего излучения, падающего в единицу времени на поверхность элементарной сферы, отнесенная к единице площади поперечного сечения этой сферы. Единица измерения интенсивности излучения $вт/м^2$. Практически применяют единицы $эрг/(сек \cdot см^2)$, $кал/(сек \cdot см^2)$, $ккал/(ч \cdot м^2)$.

Энергетический спектр излучения — распределение частиц или квантов излучения по их энергии. Различают дискретный спектр излучения и непрерывный спектр излучения. Тормозное излучение имеет непрерывный спектр, характеристическое и γ -излучение — дискретный.

Граничная длина волны — наименьшая длина волны в непрерывном спектре квантового излучения. Для рентгеновского излучения граничная длина волны равна:

$$\lambda_{\text{мин}} = \frac{12,395}{U} \text{ \AA},$$

где U — напряжение на аноде рентгеновской трубки, кв.

Спектральная плотность потока квантов излучения — энергия квантов излучения, рассчитанная на единицу спектрального интервала.

Узкий пучок излучения — направленное излучение, в котором кванты излучения или частицы распространяются почти параллельно. Узкий пучок излучения получают с помощью специального устройства — коллиматора. В простейшем случае коллиматор изготавливают из двух свинцовых экранов с соосными отверстиями, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

Широкий пучок излучения — направленное излучение, распространяющееся внутри некоторого телесного угла. Направление излучения соответствует направлению оси телесного угла, которую на практике принято называть центральным лучом.

Эффективная энергия фотонов квантового излучения (эффективная энергия квантов) — энергия фотонов такого моноэнергетического квантового излучения, относительное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины такое же, как и рассматриваемого моноэнергетического квантового излучения.

Эффективная длина волны — длина волны такого моноэнергетического квантового излучения, относитель-

ное ослабление которого в поглотителе определенного состава и определенной толщины такое же, как и рассматриваемого моноэнергетического квантового излучения.

§ 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ [3—5, 10]

Когда ионизирующее излучение проникает сквозь какую-либо среду, его кванты взаимодействуют с веществом среды, при этом изменяются энергия и направление движения квантов, т. е. происходит поглощение и рассеяние энергии излучения.

Поглощение энергии излучения — преобразование энергии ионизирующего излучения в облучаемой среде в другие виды энергии, а также в энергию других видов излучения. Различают две категории поглощения энергии ионизирующих излучений: поглощение энергии корпускулярного излучения (α - или β -излучений) и поглощение квантового излучения (рентгеновского или γ -излучения).

При прохождении через вещество излучения, состоящего из заряженных частиц последние теряют энергию на ионизацию или возбуждение атомов и молекул. Частицы с высокими энергиями, в основном электроны и позитроны, теряют энергию также на тормозное излучение (так называемые радиационные потери).

Ионизация — образование на пути пробега частиц положительных и отрицательных ионов. При каждом акте ионизации частицы или кванты вырывают из атомов внешние электроны и теряют небольшое количество энергии по сравнению с их собственной кинетической энергией.

Длина пробега частицы — путь, проходимый частицей в веществе до полной остановки. Длина пробега зависит от массы и заряда частицы, от плотности и атомного номера вещества и от энергии частицы.

Ионизационные потери — потери энергии частиц на образование ионов.

Радиационные потери — потери энергии частиц с высокими скоростями на тормозное излучение. Если быстрый электрон попадает в электрическое поле ядра, он испытывает замедление и в соответствии с законами электродинамики начинает излучать кванты электромагнитного излучения (тормозное излучение). Радиационные

потери становятся доминирующими для электронов с энергией $E \sim 10^5$ эв.

Рассеяние заряженных частиц — происходит в результате столкновения частиц с ядрами и с орбитальными электронами атомов тормозящего материала. Для электронов более существенно рассеяние в результате столкновения с ядрами тормозящего материала. Из-за малой массы электроны легко отклоняются электрическим полем ядер и атомов, при этом такое рассеяние происходит без потери энергии электронами, т. е. без передачи энергии электронам ядру.

Ослабление излучения — уменьшение потока энергии излучения, обусловленное взаимодействием ионизирующего излучения со средой.

Линейный коэффициент ослабления излучения (коэффициент ослабления) — относительное изменение интенсивности направленного излучения на единицу толщины среды. Если рассматривается не толщина среды, а ее масса, то применяется термин массовый коэффициент ослабления излучения.

Коэффициент поглощения излучения (коэффициент поглощения) — часть коэффициента ослабления, определяемая поглощением энергии излучения в веществе.

Коэффициент рассеяния излучения (коэффициент рассеяния) — часть коэффициента ослабления, определяемая рассеянием излучения в веществе.

Эффективный атомный номер вещества по поглощению (эффективный атомный номер) — атомный номер такого условного простого вещества, для которого коэффициент передачи энергии излучения, рассчитанный на один электрон, является таким же, как и для данного сложного вещества.

Поглощение квантового излучения (рентгеновского и γ -излучения) происходит статистически (вероятностно) по экспоненциальному закону. Обычно фотон удаляется из пучка в результате взаимодействия с ядром или орбитальным электроном поглощающего вещества. Известны три типа взаимодействия фотонов с веществом: фотоэлектрический эффект, рассеяние и образование пар. Количество фотонов, удаленных из моноэнергетического пучка в слое поглотителя dx , пропорционально интенсивности I , количеству атомов в единице объема поглотителя n и толщине слоя поглотителя dx . Следова-

тельно, изменение интенсивности пучка излучения имеет вид:

$$dI = -In\sigma dx,$$

где σ — коэффициент пропорциональности, представляющий общую вероятность рассеяния или поглощения фотона одним атомом. Решением уравнения является:

$$I = I_0 e^{-n\sigma x},$$

где I_0 — интенсивность падающего пучка; I — интенсивность прошедшего пучка; x — полная толщина поглотителя.

Количество атомов в единице объема n можно представить как $\frac{N\rho}{A}$, где N — число Авогадро; A — атомный вес поглощающего материала; ρ — плотность материала.

Приведенный анализ поглощения фотона предполагает геометрию узкого пучка излучения, т. е. любой отклоненный фотон, как бы ни был мал угол отклонения, считается полностью поглощенным.

σ , см^2 — атомный коэффициент ослабления узкого пучка квантового излучения; $\left(\frac{N\sigma\rho}{A}\right) = \mu \frac{1}{\text{см}}$ — линейный коэффициент ослабления узкого пучка γ -излучения; $\left(\frac{N\sigma}{A}\right) = \frac{\mu}{\rho} \frac{\text{см}^2}{\text{г}}$ — массовый коэффициент ослабления узкого пучка квантового излучения.

Значения линейных и массовых коэффициентов ослабления излучения в различных материалах в зависимости от энергии излучения приводятся в приложении 1. Атомные номера и плотность некоторых элементов приведены в приложении 2.

Полный атомный коэффициент ослабления σ является суммой коэффициентов ослабления, соответствующих трем процессам взаимодействия фотона с веществом:

$$\sigma = \tau + \sigma_p + \kappa,$$

где τ — коэффициент ослабления вследствие фотоэлектрического поглощения; σ_p — коэффициент ослабления вследствие рассеяния; κ — коэффициент ослабления вследствие образования электрон-позитронных пар.

1. Фотоэлектрический эффект — процесс, при котором фотон с энергией E_0 передает эту энергию электрону, находящемуся в оболочке атома. При этом электрон пере-

ходит на более высокий уровень или, если энергия фотона превосходит энергию связи электрона в атоме, покидает атом. Кинетическая энергия фотоэлектронов равна разности энергии фотона и энергии связи электрона в атоме. Когда энергия фотонов равняется энергии связи электронов на определенной оболочке K , L и т. д., возникает резкое увеличение коэффициента поглощения (K -, L - и т. д. линии поглощения).

Зависимость линейного коэффициента фотоэлектрического поглощения в свинце от энергии фотонов приводится на рис. 3 (кривая μ). Сплошной кривой обозначен полный коэффициент ослабления μ , пунктиром — его компоненты. Фотоэлектрическое поглощение зависит от порядкового номера Z атомов поглощающего материала и пропорционально $\sim Z^4 \div Z^5$. Этот процесс — основной при поглощении фотонов с энергией меньше $0,3—0,5$ Мэв.

2. Рассеяние фотонов — процесс, при котором ослабление интенсивности излучения происходит в результате отклонения фотонов при столкновениях с электронами атомов поглощающего материала. Рассеяние фотонов может происходить с изменением их длины волны и энергии или без изменения.

Комптовское рассеяние — рассеяние фотонов, при котором изменяется как направление распространения фотона, так и его длина волны; при этом часть энергии передается электрону (комpton-эффект). Комpton-эффект — основной процесс ослабления излучения, начиная с энергии фотонов, превышающей энергию связи электронов в атоме на K -оболочке — крайней полосы фотоэлектрического поглощения, и до энергий фотонов $3—5$ Мэв. При комpton-эффекте энергия связи электрона в атоме много меньше энергии фотона, можно считать, что электрон отдачи несет электрическую энергию, равную разности энергий падающего и рассеянного фотона. Коэффициент ослабления комptonовского рассеяния пропорционален порядковому номеру Z атомов поглощающего материала. Зависимость его в свинце от энергии фотонов приводится на рис. 3, кривая σ_s .

Когерентное рассеяние — рассеяние фотонов на атомах без изменения их энергии. Наблюдается при малой энергии фотонов, по сравнению с которой энергия связи электронов в атоме существенна. При этом под влиянием падающих фотонов возникают вынужденные коле-

бания орбитальных электронов. Действуя сообща, они испускают фотон той же частоты, что и падающий. Такое когерентное рассеяние в общем коэффициенте рас-

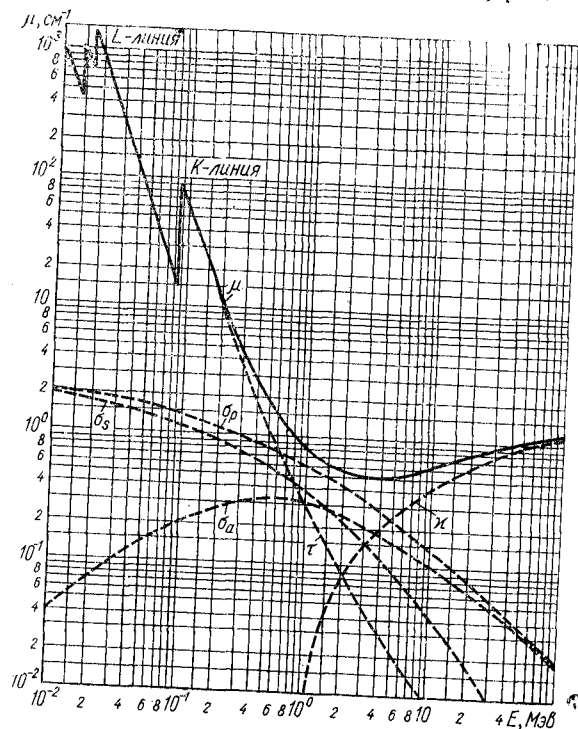


Рис. 3. Зависимость коэффициентов ослабления излучения в свинце от энергии квантов излучения:

μ — полный линейный коэффициент ослабления; σ_p — суммарный коэффициент рассеяния излучения; σ_s — коэффициент комptonовского рассеяния; σ_a — коэффициент когерентного рассеяния; τ — коэффициент фотоэлектрического поглощения; κ — коэффициент ослабления излучения в результате образования пар.

сения составляет не более 20% и в расчете обычно не учитывается.

3. Образование электрон-позитронных пар — процесс поглощения фотонов высокой энергии, в результате которого фотон в электрическом поле ядра преобразуется в электрон и позитрон. Так как электрон и позитрон

имеют массу, неравную нулю, то на образование этой массы требуется определенная энергия, и поглощение фотонов за счет образования пар возможно лишь при энергии фотонов выше 1,02 Мэв. Избыток энергии фотона при создании электрон-позитронной пары превращается в кинетическую энергию электрона и позитрона.

Коэффициент ослабления излучения за счет образования пар зависит от квадрата атомного номера поглотителя (Z^2). Зависимость его от энергии фотонов в свинце приведена на рис. 3, кривая ж.

Коэффициент ослабления смесей и соединений. Массовый коэффициент ослабления $\frac{\mu}{\rho}$ смеси или соединения представляет собой сумму массовых коэффициентов ослабления составляющих элементов $\frac{\mu}{\rho}(a)$, $\frac{\mu}{\rho}(b)$, умноженных на пропорциональное содержание соответствующих компонентов в весовых процентах $R(a)$, $R(b)$ и т. д., и равен

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu}{\rho}(a)R(a) + \frac{\mu}{\rho}(b)R(b) + \dots$$

Вторичное излучение — излучение, возникающее в результате взаимодействия первичного излучения с веществом. Вторичным является многократно рассеянное излучение и тормозное излучение электронов, позитронов, фотоэлектронов и электронов отдачи, образующихся в процессах фотоэлектрического поглощения, комптонового рассеяния и образования пар. Вторичное излучение снижает чувствительность и разрешающую способность радиографического метода.

Ослабление широкого пучка. В отличие от узкого пучка излучения, в котором рассеянный квант считается поглощенным, широкий пучок излучения ослабляется несколько меньше, так как в этом случае рассеянный квант может попасть в регистрирующий прибор. Поэтому интенсивность широкого пучка излучения при прочих одинаковых условиях всегда оказывается больше, чем интенсивность узкого пучка излучения.

Получить узкий пучок излучений довольно сложно, поэтому в практике почти всегда имеют дело с широкими пучками излучений. В соответствии с этим различают коэффициент ослабления узкого пучка излучений $\mu_{\text{ш}}$

и коэффициент ослабления широкого пучка излучений $\mu_{\text{ш}}$, причем $\mu_{\text{ш}} < \mu$.

Фактор накопления. Так как вторичное излучение существенно влияет на характеристику пучка излучения, необходимо учесть меру этого влияния.

Вклад многократно рассеянного излучения в показания детектора при измерениях в условиях широкого пучка удобно определить через коэффициент, называемый фактором накопления и определяемый как отношение эффекта, вызванного излучением в условиях широкого пучка, к эффекту, вызванному в условиях узкого пучка:

$$B = \frac{I_{\text{ш}}}{I} = \frac{I + I_{\text{р}}}{I},$$

где $I_{\text{ш}} = I + I_{\text{р}}$ — интенсивность широкого пучка излучений; $I_{\text{р}}$ — интенсивность вторичного излучения; I — интенсивность узкого пучка излучения.

Фактор накопления зависит от многих переменных: энергии квантов, углового распределения излучения и геометрии источника, атомного номера и толщины защитного материала, геометрии и компоновки защиты, положения источника и детектора по отношению к защите.

В зависимости от характера регистрирующего прибора или определяемого эффекта различают следующие типы факторов накопления.

1. **Фактор накопления для числа квантов** (численный фактор накопления), т. е. отношение плотности потока γ -квантов всех энергий (нерассеянных и рассеянных) в точке детектирования к плотности потока первичных нерассеянных γ -квантов в той же точке.

2. **Энергетический фактор накопления**, т. е. отношение интенсивности первичного и вторичного излучений в точке детектирования к интенсивности только первичного излучения в той же точке.

3. **Дозовый фактор накопления**, т. е. отношение экспозиционной дозы излучения в воздухе, созданной излучением всех энергий (первичных и рассеянных) в точке детектирования, к той же дозе в воздухе, созданной только первичными нерассеянными квантами в этой же точке.

4. **Фактор накопления поглощенной энергии**, т. е. отношение поглощенной дозы в данном материале в точке детектирования, созданной первичным и вторичным

рассеянным излучениями, к поглощенной дозе только от первичного излучения в той же точке.

Слой половинного ослабления — толщина слоя поглощающего материала, необходимая для ослабления интенсивности излучения в 2 раза. Слой половинного ослабления характеризует поглощающую способность материала для излучения определенной энергии. Толщину слоя половинного ослабления для узкого пучка излучения можно вычислить по экспоненциальному закону

$$\frac{\delta_{0,1}}{2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu},$$

где μ — коэффициент ослабления излучения в поглощаемом материале.

Значения слоев половинного ослабления излучения в различных материалах в зависимости от энергии излучения приводятся в приложении 1.

Экспозиционная доза ионизирующего излучения D_0 — количественная характеристика рентгеновского и γ -излучения, основанная на их ионизирующем действии в сухом атмосферном воздухе и выраженная отношением суммарного электрического заряда ионов одного знака, образованного излучением, поглощенным в некоторой массе воздуха, к этой массе:

$$D_0 = \frac{Q}{m},$$

где Q — суммарный электрический заряд ионов одного знака в кулонах (κ); m — масса воздуха, кг.

Единицей экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений, согласно ГОСТ 8848—63, является кулон на килограмм ($\kappa/\text{кг}$).

На практике широко применяется внесистемная единица измерения экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений — рентген (p), $1 p = 2,57976 \cdot 10^{-4} \kappa/\text{кг}$.

Рентген — единица экспозиционной дозы рентгеновского или γ -излучения, которое в $1,293 \cdot 10^{-6}$ кг воздуха при завершении в нем всех ионизационных процессов создает ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака. $1,293 \times 10^{-6}$ кг — масса 1 см^3 атмосферного воздуха при нормальных условиях (температуре 0°C и давлении 760 мм рт. ст.).

Применяют также единицы миллирентген (mp) и микроцентген (mkr),

$$1 mp = 10^{-3} p.$$

$$1 mkr = 10^{-6} p.$$

Экспозиционная доза в $1 p$ создает при нормальных условиях в 1 см^3 воздуха $2,08 \cdot 10^9$ пар ионов, в 1 г воздуха — $1,6 \cdot 10^{12}$ пар ионов. Энергетические эквиваленты рентгена: $1 p = 0,114 \text{ эрг} = 7,1 \cdot 10^4 \text{ Мэв}$ поглощенной энергии в 1 см^3 воздуха при нормальных условиях; $1 p = 0,88 \text{ эрг} = 5,5 \cdot 10^7 \text{ Мэв}$ поглощенной энергии в 1 г воздуха при нормальных условиях; $1 p = 0,88 \cdot 10^{-2} \text{ Дж}$ поглощенной энергии в 1 кг воздуха при нормальных условиях.

Единицы экспозиционной дозы кулон на килограмм ($\kappa/\text{кг}$) и рентген (p) применяют для измерения излучений с энергией квантов менее 3 Мэв ¹.

Мощность экспозиционной дозы ионизирующего излучения (P_0) определяется как экспозиционная доза в единицу времени

$$P_0 = \frac{D_0}{t},$$

где D_0 — экспозиционная доза излучения, $\kappa/\text{кг}$; t — время, сек; P_0 — мощность экспозиционной дозы излучения, $\text{а}/\text{кг}$. Практически используют единицы: $p/\text{сек}$; $mp/\text{сек}$; $mkr/\text{сек}$; $p/\text{мин}$; $p/\text{ч}$;

$$1 p/\text{сек} = 2,57976 \cdot 10^{-4} \text{ а}/\text{кг}.$$

Предельно допустимая доза излучения (предельно допустимая доза) — максимальное значение дозы излучения, установленное Санитарными правилами работы с источниками ионизирующих излучений [30]. Правилами установлены три категории облучения: профессиональное (A); лиц, работающих в смежных помещениях (B), и облучение всего населения (B) с предельно допустимыми недельными дозами внешнего облучения всего организма 100 , 10 и $1 mp$ соответственно.

При работе t часов в неделю предельно допустимая мощность дозы облучения P_0 для лиц категории A подсчитывается по формуле

$$P_0 = \frac{100}{t} mp/\text{ч}.$$

¹ Для измерения излучений с энергией квантов более 3 Мэв применяется единица дозы $1 \text{ рад} = 100 \text{ эрг}/\text{г}$.

Поглощенная доза излучения ($D_{\text{п}}$) определяется как энергия любого ионизирующего излучения, поглощенная единицей массы облученного вещества, и равна

$$D_{\text{п}} = \frac{W}{m},$$

где W — энергия ионизирующего излучения, поглощенная веществом, дж; m — масса облученного вещества, кг.

На практике применяется единица поглощенной дозы излучения — 1 рад. Доза в 1 рад соответствует энергии 100 эрг, поглощенной в 1 г облученного вещества:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ дж/кг}.$$

Мощность поглощенной дозы излучения ($P_{\text{п}}$) — поглощенная доза, рассчитанная на единицу времени:

$$P_{\text{п}} = \frac{D_{\text{п}}}{t}.$$

Единица измерения — вт/кг. На практике применяется 1 рад/сек = 0,01 вт/кг.

§ 3. РЕГИСТРАЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Прохождение ионизирующего излучения через облучаемую среду сопровождается различными воздействиями излучения на среду (ионизация, тепловое и фотохимическое воздействие, флуоресценция и др.), поэтому становится возможной регистрация ионизирующих излучений. Существует несколько методов обнаружения излучений [6, 7, 10].

Ионизационный метод регистрации излучений. Основан на регистрации ионов, образуемых ионизирующими излучениями в облучаемой среде. В качестве облучаемой среды обычно используется газ, заключенный в ограниченном объеме — ионизационном детекторе излучений. Имеется три вида ионизационных газовых детекторов излучения.

1. Ионизационная камера. Принцип действия ионизационной камеры основан на ионизации атомов газа, заполняющего камеру, ионизирующими частицами или квантами излучения. В камере расположены два металлических электрода, к которым приложена разность потенциалов, создающая электрическое поле в пространстве между электродами.

Ионы, образовавшиеся в камере ионизирующим излучением — β -частицами или квантами электромагнитного излучения, — двигаются в электрическом поле к электродам, полярность которых противоположна знаку заряда ионов. В камере возникает ток, величина которого пропорциональна числу ионов, создаваемых излучением в камере, и, следовательно, пропорциональна интенсивности излучения. На рис. 4 показана зависимость величины импульса от приложенного к электродам газовой камеры напряжения. Область 1 соответствует работе ионизационных камер.

Ионизационные камеры работают при небольших напряжениях 100—200 в, при этом ток ионизационной камеры не зависит от напряжения на электродах и определяется интенсивностью излучения. Основными недостатками ионизационной камеры являются малая величина получаемого сигнала и низкая эффективность регистрации квантового излучения.

2. Пропорциональные счетчики. Ионизационная камера, работающая в режиме газового усиления, называется пропорциональным счетчиком (см. рис. 4, область 2). Если на электродах ионизационной камеры поднять напряжение до 300—500 в, то электроны и ионы, создаваемые ионизирующим излучением в объеме камеры, ускоряясь в электрическом поле, приобретут кинетическую энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Ускоренные электроны и ионы создают на своем пути новые ионы и т. д. Возникает лавинообразный процесс, называемый газовым усилением. Коэффициент газового усиления может изменяться от 10 до 10^6 . Величина выходного сигнала и коэффициент газового

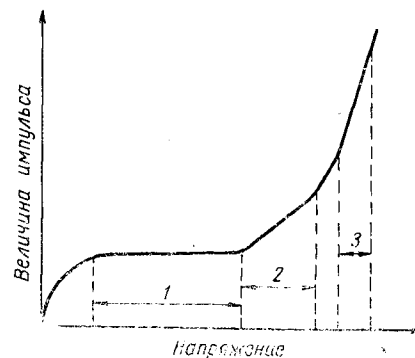


Рис. 4. Зависимость величины импульса от напряжения на электродах в газовом счетчике. Приложенное напряжение характеризует рабочий режим счетчика. В областях 1, 2 и 3 работают соответственно ионизационные камеры, пропорциональные счетчики и счетчики Гейгера—Мюллера.

усиления в пропорциональном счетчике зависят от напряжения на электродах. Пропорциональные счетчики в отличие от ионизационных камер работают в импульсном режиме и их применяют для измерения энергии частиц и регистрации излучения определенного типа в присутствии другого излучения.

3. Газоразрядные счетчики (Гейгера — Мюллера). Пропорциональные счетчики, работающие в режиме газового разряда, называются газоразрядными (см. рис. 4, область 3). Если увеличить напряжение на электродах счетчика до 1200—1500 в, то процесс газового усиления приводит к разряду по всей длине электрода. Даже одного электрона, образованного квантом или частицей ионизирующего излучения, достаточно, чтобы возник разряд во всем объеме счетчика. После возникновения разряда у анода начинают скапливаться ионы, экранирующие его электрическое поле. Когда поле анода уменьшается до значения поля на границе газового усиления, разряд затухает. Импульс на выходе газоразрядного счетчика имеет большую величину от 1 до 50 в и может быть зарегистрирован без усиления.

Величина выходного импульса не зависит от типа и энергии ионизирующей частицы. Газоразрядные счетчики имеют небольшую эффективность регистрации квантового излучения (1—2% при энергии квантов 1 Мэв). Существуют газоразрядные счетчики, заполненные многоатомным органическим газом, работающие при меньших напряжениях 500—600 в, — галогенные самогасящиеся счетчики.

Фотографический метод регистрации излучений основан на фотохимическом действии ионизирующих излучений. Детектором излучения является фотографическая пленка. Ионизирующее излучение образует в светочувствительном слое пленки фотоэлектроны и электроны отдачи. При взаимодействии фотоэлектронов с зернами бромистого серебра образуются атомы серебра, которые способствуют проявлению всего зерна. В процессе проявления происходит усиление скрытого изображения в 10^9 раз. Проявленная после облучения фотографическая пленка выглядит потемневшей, причем оптическая плотность потемнения пленки пропорциональна интенсивности излучения (мощности дозы излучения) и времени воздействия излучения на пленку (поглощенной дозе излучения).

Сцинтилляционный метод регистрации излучений основан на явлении люминесценции. Люминесценция — свойство некоторых веществ — фосфоров — преобразовывать поглощенную энергию ионизирующих излучений в видимый свет, т. е. свечение фосфоров под действием

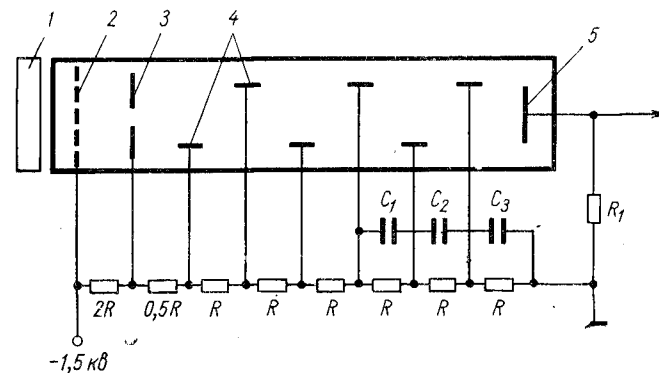


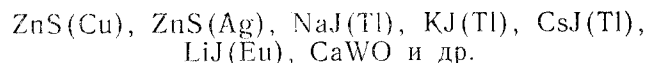
Рис. 5. Схема включения фотоумножителя:
1 — сцинтилляционный кристалл; 2 — фотокатод; 3 — фокусирующий электрод; 4 — диноды; 5 — анод.

ионизирующих излучений. Поглощенная энергия ионизирующих излучений идет на возбуждение атомов и молекул фосфора, а затем через некоторое время — период высвечивания фосфора — излучается ими в виде квантов видимого света. Если период высвечивания фосфора меньше 10^{-7} сек, то явление называется флуоресценцией, и фосфоресценцией, — если период высвечивания больше 10^{-7} сек.

1. Сцинтилляционный счетчик излучения состоит из сцинтилляционного кристалла, фотоэлектронного умножителя ФЭУ и электронной схемы. Ионизирующее излучение поглощается в сцинтилляторе и вызывает его свечение. Кванты видимого света попадают на фотокатод ФЭУ и вырывают из него фотоэлектроны. Фотоэлектроны попадают на первый динод ФЭУ и в свою очередь освобождают из него вторичные электроны. В результате многократного повторения процесса в ФЭУ происходит лавинообразное нарастание потока электронов, вызывающее падение напряжения на аноде ФЭУ. На рис. 5 показана схема включения фотоумножителя.

На выходе прибора образуется электрический импульс, амплитуда которого пропорциональна энергии поглощенной ионизирующей частицы или кванта ионизирующего излучения.

В качестве сцинтилляционных кристаллов применяют неорганические соединения, активированные тяжелыми элементами:



(в скобках указан элемент-активатор), органические соединения — антрацен, стильбен, некоторые пластики и жидкости.

Эффективность регистрации квантового излучения в сцинтилляционных счетчиках достигает 60% и более.

2. Флуоресцирующие экраны — детекторы ионизирующих излучений, преобразующие падающее на них излучение в видимый свет.

Флуоресцирующие экраны применяют для непосредственного преобразования рентгеновского или гамма-изображения в видимое. Экран — это толстое защитное свинцовое стекло с нанесенным на него слоем флуоресцирующего состава — люминофора. Наиболее широко в качестве люминофора применяют цинк-кадмиевый сульфид. Цвет флуоресценции варьируется путем введения определенного количества металлических примесей-активаторов и выбирается таким, чтобы спектр свечения экрана соответствовал максимальной чувствительности нормального глаза (желто-зеленый свет).

3. Усиливающие флуоресцирующие экраны преобразуют кванты ионизирующего излучения в кванты видимого или ультрафиолетового света, их применяют в сочетании с рентгеновской пленкой для усиления фотографического действия рентгеновского и γ -излучения. Усиливающий экран состоит из тонкой пластмассовой основы, на которую нанесен тонкий слой люминофора. Отечественной промышленностью изготавливаются несколько типов экранов: кальций-вольфраматные (CaWO_4), свинцово-баритовые $[(\text{BaPb})\text{SO}_4]$ и др. с различной нагрузкой светосостава — количеством люминофора на единицу площади экрана.

Применение усиливающих экранов в радиографии позволяет существенно сократить экспозиции при просвечивании.

В радиационной дефектоскопии широко применяется рентгеновское и γ -излучение радиоактивных изотопов. В соответствии с этим используются две группы источников ионизирующих излучений: радиоактивные источники и электронные [10].

Радиоактивные источники ионизирующего излучения. Явление радиоактивного распада во всех случаях сопровождается возникновением ионизирующих излучений. Поэтому к радиоактивным источникам излучения можно отнести все радиоактивные изотопы, испускающие при распаде α -, β - и γ -излучение [8—10]. Однако из огромного числа радиоактивных изотопов, известных в настоящее время, в радиационной дефектоскопии применяются лишь те, характеристики которых удовлетворяют трем основным требованиям дефектоскопии: высокая проникающая способность излучения, достаточно высокая интенсивность излучения и достаточно продолжительный период полураспада. Почти все радиоактивные изотопы, удовлетворяющие этим требованиям, изготавливают искусственным путем (стабильный изотоп облучают потоком нейтронов, и ядро, захватившее нейтрон, становится радиоактивным).

Каждый радиоактивный изотоп характеризуется периодом полураспада, энергией и спектром излучения, удельной активностью и γ -постоянной. Энергия и спектр излучения определяются схемой распада, а удельная активность зависит от химического состава вещества, в которое входит радиоактивный изотоп, и от его процентного содержания в этом веществе.

Основные характеристики радиоактивных изотопов, применяемых в радиационной дефектоскопии, приводятся в табл. 3. Для дефектоскопии просвечиванием

Таблица 3

Радиационные характеристики радиоактивных изотопов [8]

Изотоп	Период полу- распада, T	Энергия, Мэв		Полная γ -постоянная, $\rho \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мюри})$	Мощность экспозицион- ной дозы от источника в 1 мюри, $10^{-7} \rho \cdot \text{м}^2/\text{сек}$	
		β -частиц	γ -квантов			
$^{14}_6\text{C}$	5700 лет	0,155	—	—	—	
$^{60}_{27}\text{Co}$	5,3 года	0,390	2,158	12,93	3,59	
		(~100%)	1,333			
		1,482 (~0,05%)	1,172 0,825			
$^{75}_{34}\text{Se}$	127 дней	—	0,572	1,94	0,53	
			0,478			
			0,401			
			0,370			
			0,305			
			0,280			
			0,265			
			0,199			
			0,136			
			0,121			
			0,121			
$^{85}_{36}\text{Kr}$	10,6 года	0,672 (95%) 0,15 (5%)	—	—	—	
						—
						—
$^{90}_{38}\text{Sr}$	25 лет	0,535	—	—	—	
$^{90}_{39}\text{Y}$	64 ч	2,24	—	—	—	
$^{106}_{44}\text{Ru}$	1 год	0,039	—	—	—	
$^{106}_{45}\text{Rh}$	30 сек	3,53 (68%)	—	—	—	
		3,1 (11%)				
		2,44 (12%)				
		2,0 (3%)				
$^{134}_{55}\text{Cs}$	2,05 года	0,657 (68%)	—	8,58	2,38	
		0,410 (5%)				
		0,210 (2%)				
		0,078 (25%)				
		0,960				
		0,801				
		0,796				
		0,605				
0,570						

Продолжение табл. 3

Изотоп	Период полу- распада, T	Энергия, Мэв		Полная γ -постоянная, $\rho \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мюри})$	Мощность экспозицион- ной дозы от источника в 1 мюри, $10^{-7} \rho \cdot \text{м}^2/\text{сек}$
		β -частиц	γ -квантов		
$^{137}_{55}\text{Cs}$	33 года	1,17 (8%) 0,51 (92%)	—	3,10	0,569
					0,563
					0,475
$^{144}_{58}\text{Ce}$	284 дня	0,300 (70%) 0,170 (30%)	—	0,040	0,661
					0,134
$^{144}_{60}\text{Pr}$	17,3 мин	2,97 (98%) 2,3 (1%) 0,86 (1%)	—	0,143	0,409
					0,100
					0,080
					0,059
					0,053
					0,036
					0,036
$^{147}_{61}\text{Pm}$	2,6 года	0,223	—	—	2,19
					1,49
					0,696
$^{145}_{62}\text{Sm}$	410 дней	—	—	—	0,061
$^{152}_{63}\text{Eu}$	12,7 года	1,49 (~8%) 1,07 (~1%) 0,69 (~16%) 0,36 (4%) 0,19 (~2%) Э.з. (~69%)	—	5,02	1,405
					1,210
					1,110
					1,085
					0,963
					0,866
					0,720
					0,550
$^{154}_{63}\text{Eu}$	16 лет	1,45	—	6,24	0,442
					0,244
					0,122
					0,122
					0,122
					1,277
					1,007
					0,998
					0,875
					0,759
0,725					
0,706					
0,694					

Продолжение табл. 3

Изотоп	Период полураспада, T	Энергия, Мэв		Полная γ -постоянная, $\rho \cdot \text{см}^2/(\text{ч} \cdot \text{мюри})$	Мощность экспозиционной дозы от источника в 1 мюри, $10^{-7} \rho \cdot \text{м}^2/\text{сек}$
		β -частиц	γ -квантов		
$^{154}_{63}\text{Eu}$			0,593		
			0,248		
			0,123		
$^{155}_{63}\text{Eu}$	1,81 года	0,243 (20%) 0,154 (80%)	0,132	0,861	$2,39 \cdot 10^{-1}$
			0,125		
			0,106		
			0,100		
			0,087		
			0,061		
$^{153}_{64}\text{Cd}$	200 дней		0,103	0,221	$6,14 \cdot 10^{-2}$
			0,097		
			0,081		
			0,070		
$^{170}_{69}\text{Tm}$	129 дней	0,968 (76%) 0,884 (24%)	0,084	0,01	$2,78 \cdot 10^{-3}$
$^{192}_{77}\text{Ir}$	74,37 дня	0,673 (50%) 0,537 (42%) 0,257 (~8%)	1,060	4,65	1,29
			0,613		
			0,604		
			0,588		
			0,485		
			0,468		
			0,417		
			0,375		
			0,316		
			0,308		
			0,296		
			0,283		
			0,206		
0,201					
$^{204}_{81}\text{Tl}$	4,1 года	0,765 (98%) Э. з. (~2%)		—	—

(радиографии, визуальных и радиометрических методов) применяют в основном источники γ - и смешанного (γ и β)-излучения. В радиационной толщинометрии главным образом используют источники смешанного и β -излучения.

Электронные источники ионизирующих излучений. Генерирование ионизирующего излучения во всех элек-

тронных источниках излучения основывается на радиационных потерях, возникающих при торможении в материале мишени электронов, ускоренных до больших энергий электрическим полем. К числу электронных источников относятся генераторы рентгеновского излучения — рентгеновские аппараты и высоковольтные установки — и генераторы тормозного излучения — индукционные ускорители электронов (бетатроны). Основным преимуществом электронных источников излучения является возможность регулирования энергии и интенсивности излучения.

§ 1. РАДИОАКТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Радиоактивные источники для гамма-дефектоскопии. Для гамма-дефектоскопического контроля качества материалов, деталей и изделий источники изготавливают из радиоактивных изотопов с высокой удельной активностью и достаточно продолжительным периодом полураспада. Исходный изотоп (сырье) упаковывают в герметически закрытую ампулу и облучают потоком нейтронов.

Ампулы для источников делают из чистого алюминия марки АД-1 в виде цилиндрического стакана. В том случае, если энергия квантов радиоактивного изотопа велика и поглощение излучения изотопа в материале ампулы незначительно, ампулы для источников могут быть изготовлены из пержавеющей стали (например, для источников из ^{60}Co).

После наполнения сырьем ампулу закрывают крышкой из того же материала и завальцовывают. После облучения на ампулу наносится герметическое покрытие из эпоксидного клея. Иногда для повышения герметичности источник заключают в двойную ампулу.

Активная часть источника — внутренний объем ампулы, заполненный радиоактивным веществом — определяет дефектоскопические характеристики источника. Диаметр активной части при просвечивании выступает как размер фокусного пятна. Высоту активной части при заданном диаметре выбирают из условия достижения максимальной активности источника с учетом поглощения излучения в самом источнике.

Радиационные характеристики радиоактивных источников. Основными радиационными характеристиками

источников, применяемых в гамма-дефектоскопии, являются: 1) спектральный состав излучения источников; 2) радиационный выход источника излучения.

Спектр излучения. Спектр излучения источника отличается от спектра излучения основного радиоактивного изотопа. Это различие обусловлено радиоактивными примесями в материале и оболочке источника и тормозным излучением β -частиц в материале и оболочке источника, а также поглощением и рассеянием излучения в самом источнике. Из радиоактивных примесей в источниках, применяемых в дефектоскопии, важны лишь радиоактивные примеси, долгоживущие по сравнению с основным радиоактивным изотопом, а также качественно изменяющие его спектральный состав излучения. В некоторых случаях распад основного изотопа сопровождается образованием нового нестабильного изотопа (например, при распаде $^{144}_{58}\text{Ce}$ образуется радиоактивный изотоп $^{144}_{59}\text{Pr}$). В этом случае спектр излучения источника помимо энергетических линий спектра основного изотопа содержит спектральные линии дочернего изотопа.

Радиационный выход источника. Радиационный выход источника излучения (активность источника) определяет количество излучения источника или дозу излучения источника. Активность источников измеряется в кюри (*кюри*) или в грамм-эквивалентах радия (*г-экв Ra*) и зависит от удельной активности соединения, в которое входит радиоактивный изотоп, от количества этого соединения в источнике и от поглощения излучения в материале источника. Доза D в рентгенах, создаваемая излучением радиоактивного источника активностью Q *мкюри* на расстоянии R *см* за время t *ч*, определяется соотношением

$$D = K_{\gamma} \frac{Qt}{R^2},$$

где K_{γ} — ионизационная постоянная для данного радиоактивного изотопа, характеризующая мощность дозы излучения в рентгенах в час (*р/ч*), создаваемую точечным источником активностью 1 *мкюри* на расстоянии 1 *см*.

Если активность источника выражена в *г-экв Ra*, то доза излучения источника равна

$$D = \frac{8,4M}{R^2} t,$$

где M — активность источника, *г-экв Ra*; R — расстояние от источника, *см*; t — время, *ч*, 1 *г-экв Ra* создает мощность дозы $2,33 \cdot 10^{-4}$ *р/сек* на расстоянии 1 *м*.

Активность источника может быть выражена в кюри. Эти единица применяется для сравнения различных источников одного и того же изотопа. Для сравнения источников из различных изотопов удобнее выражать активность в грамм-эквивалентах радия. Активность источника определяется количеством сырья, из которого изготовлен источник, и от удельной активности активированного сырья. При заданном диаметре активной части активность источника, приведенная к его оси, зависит от высоты активной части, вследствие поглощения излучения в самом материале источника (самопоглощения). На практике высота активной части не превышает трех длин свободного пробега γ -квантов в материале источника $\frac{1}{\mu}$, где μ — линейный коэффициент ослабления излучения эффективной энергии в материале источника. Радиевый γ -эквивалент M протяженного источника цилиндрической формы, измеряемый на оси цилиндра, с учетом поглощения излучения в самом источнике, равен

$$M = Cq \frac{\pi\Phi^2}{4} \cdot \frac{1 - e^{-\mu H}}{\mu},$$

где C — коэффициент пропорциональности; q — удельная активность источника; Φ — диаметр источника; μ — линейный коэффициент поглощения γ -излучения в материале источника; H — высота источника.

Если поглощением излучения в материале источника можно пренебречь, то в этом случае радиевый γ -эквивалент источника равен:

$$M_0 = Cq \frac{\pi\Phi^2}{4} H.$$

Из этих формул следует, что M_0 пропорционально высоте H , а M стремится к насыщению (к величине $Cq \frac{\pi\Phi^2}{4} \cdot \frac{1}{\mu}$).

Связь между активностью, выраженной в *мкюри*, и активностью, выраженной в *г-экв Ra*, дается соотношениями:

$$M = Q \frac{K_{\gamma}}{8,4}; \quad Q = M \frac{8,4}{K_{\gamma}},$$

где M — активность, *мг-экв* Ra; Q — активность, *мкюри*; K_1 — ионизационная постоянная радиоактивного изотопа, $\frac{p \cdot \text{см}^2}{\text{ч} \cdot \text{мкюри}}$.

Вследствие радиоактивного распада, происходящего в материале источника, число радиоактивных атомов в нем постоянно уменьшается и активность источника со временем убывает. Это изменение активности источника со временем описывается уравнением:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\frac{0,693}{T} t},$$

где Q_0 — начальная активность источника излучения; Q_t — активность того же источника спустя время t ; T — период полураспада изотопа.

Относительное изменение активности радиоактивных источников со временем показано на рис. 6.

Дефектоскопические характеристики радиоактивных источников. Радиационные характеристики радиоактивных источников излучения определяют их дефектоскопические характеристики. Основные дефектоскопические характеристики источников излучения:

- 1) диапазон просвечиваемых толщин;
- 2) чувствительность метода;
- 3) экспозиции при просвечивании.

Диапазон просвечиваемых толщин. Поглощение излучения радиоактивных источников в различных материалах определяет область их применения — толщину и плотность просвечиваемых материалов, а также характеризует необходимую толщину защиты для обеспечения безопасной работы при проведении работ по гамма-дефектоскопии.

Чувствительность метода. Размер минимального дефекта, выявляемого при гамма-дефектоскопическом контроле, характеризует чувствительность этого метода. Чувствительность зависит от многих параметров: энергии излучения, толщины и плотности просвечиваемого материала и др. Для каждого радиоактивного изотопа и просвечиваемого материала определенной плотности имеется такой диапазон толщин, при просвечивании которых достигается наивысшая чувствительность. Таким образом, в ряде случаев получаемая при контроле чувствительность может быть взята в качестве критерия при определении области применения изотопа.

Экспозиция. Длительность экспозиции при просвечивании зависит от степени ослабления излучения источников в различных материалах, от активности источни-

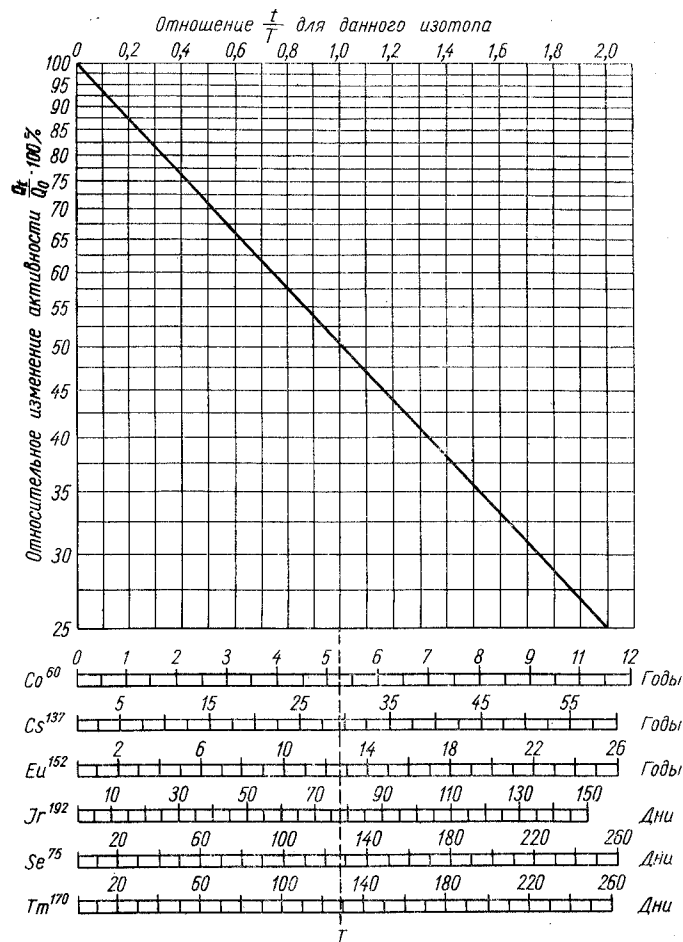


Рис. 6. Относительное изменение активности радиоактивных источников излучения со временем.

ков и от чувствительности пленки. Величина экспозиции определяет производительность гаммаграфического метода контроля и вместе с чувствительностью метода

просвечивания характеризует область применения радиоактивных источников в дефектоскопии.

Защита от излучения радиоактивных источников. Защита от излучения источников должна обеспечивать условия безопасной работы с ними. Величина необходимой защиты зависит от энергии излучения и активности радиоактивных источников. Вместе со стоимостью источников затраты на защиту определяют экономическую сторону применения изотопов в дефектоскопии.

Таблица 4

Основные характеристики радиоактивных источников излучения

Источник	γ -Эквивалент источников, g -экв Ra	Размеры источника, мм			
		Активная часть		Ампула	
		диаметр	высота	диаметр	высота
$^{170}_{69}\text{Tm}$	0,1	2	2	4,5	5
	0,5	9	6,5	12	10
$^{75}_{34}\text{Se}$	0,5	7	7	12,5	12,5
	0,75	7	7	12,5	12,5
	1,0	11	10	16,5	16,5
	1,5	11	10	16,5	16,5
	2,0	11	10	16,5	16,5
$^{192}_{77}\text{Ir}$	0,1	2	2	4,5	5
	0,5	2	2	4,5	5
	2,0	2	2	4,5	5
	5,0	2	2	4,5	5
	20,0	5	5	7,5	8
$^{137}_{55}\text{Cs}$	0,5	5—6	8	7—8	14—15
	2,0	5—6	8	7—8	14—15
	10,0	10—11	12	16—17	18—19
	20,0	10—11	18	16—17	24—25
$^{152}_{63}\text{Eu}$	0,5	5	5	7,5	8
	1,0	5	5	7,5	8
	2,0	5	5	7,5	8
$^{60}_{27}\text{Co}$	0,5	5	5	6	6,5
	2,0	5	5	6	6,5
	2,5	2	2	6	Без оболочки
	5	5	10	6	11,5
	20	10	10	11	11,5
	50	10	15	11	16,5
50	5	5	6	6,5	

Основные характеристики радиоактивных источников излучения, применяемых в радиографическом методе радиационной дефектоскопии, приводятся в табл. 4.

Область применения источников в дефектоскопии. Под этим термином понимают тот интервал толщин и плотностей контролируемых материалов, в котором при просвечивании достигается оптимальная чувствительность радиографического метода. Область применения радиоактивных источников излучения в дефектоскопии определяется энергией излучения и активностью, так как продолжительность необходимых экспозиций не должна превышать допустимой величины. Область применения источников в радиографии приводится в табл. 5.

Таблица 5

Область применения радиоактивных изотопов в гамма-дефектоскопии

Источники излучения	Эффективная толщина просвечиваемого материала, мм			
	Сплавы на основе:			
	железа	титана	алюминия	магния
^{155}Eu	0,5—6	1—10	3—30	7—75
^{170}Tm	1—20	2—40	5—70	20—170
^{75}Se	5—30	7—50	20—200	30—250
^{192}Ir	10—60	15—100	45—250	65—300
$^{152}, ^{154}\text{Eu}$	20—80	40—150	95—300	130—420
^{137}Cs	15—120	20—200	50—400	100—550
^{60}Co	30—200	60—340	190—550	280—820

Источники тормозного излучения. В радиографии может быть использовано тормозное излучение электронов β -источников [10]. Для этого радиоактивный источник β -излучения помещают на мишень (из бериллия или алюминия), в которой при торможении электронов (β -частиц) генерируется тормозное излучение. В качестве источников электронов применяют радиоактивные источники β -излучения $^{90}_{38}\text{Sr}$, $^{204}_{81}\text{Tl}$ и др.

Источники для радиационной толщинометрии. В радиационной толщинометрии применяют источники смешанного ($\gamma + \beta$)- и β -излучения. Подробнее характери-

стики этих источников рассматриваются в гл. 8, § 2.

Оформление заказа на радиоактивные источники излучения и радиационную технику производится в соответствии с «Информационным письмом» [11]. Порядок заказа радиоактивных источников приводится в приложении 3.

§ 2. РЕНТГЕНОВСКИЕ И ГАММА-АППАРАТЫ, УСКОРИТЕЛИ И БЕТАТРОНЫ

Для получения рентгеновского излучения и использования γ - и β -излучения радиоактивных изотопов для нужд дефектоскопии применяется различная радиационная техника, к которой относятся рентгеновские аппараты непрерывного и импульсного действия, линейные ускорители, бетатроны и гамма-аппараты.

1. Рентгеновские аппараты [10, 12—14]

Рентгеновский аппарат служит для получения рентгеновского излучения с заданными параметрами и состоит из рентгеновской трубки, генератора высокого напряжения и контрольной аппаратуры.

Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон, из которого откачан воздух, с впаянными в него электродами — катодом и анодом. Подогреваемый катод служит источником электронов. Испускаемые катодом электроны ускоряются электрическим полем между анодом и катодом. Анод является мишенью, в которой происходит торможение ускоренных электронов и возникает рентгеновское излучение. Для повышения к. п. д. установки анод изготавливают из тугоплавкого металла с большим атомным весом.

Коэффициент полезного действия (к. п. д.) установки определяется той частью энергии электронов, которая переходит в энергию рентгеновского излучения. Чем больше атомный вес материала анода, тем сильнее тормозятся в нем электроны, тем больше радиационные потери и тем выше к. п. д. установки. Однако к. п. д. зависит от энергии электронов и быстро растет с ее увеличением. При напряжении на аноде U меньше 100 кВ к. п. д. равен $\sim 0,1\%$, при $U=100$ кВ к. п. д. $\sim 1\%$, при $U=2$ МВ к. п. д. $\sim 10\%$ и при $U=15$ МВ к. п. д. достигает 50% и более.

Отвод тепла. Большая часть энергии электронов при торможении их в материале анода выделяется в виде тепла, и анод сильно разогревается. При низком напряжении и ограниченном числе рабочих циклов отвод тепла осуществляется лучеиспусканием и конвекцией. При мощности на входе рентгеновской установки более 1 кВт анод изготавливают в виде полый трубки и отвод тепла осуществляется циркулирующей через трубку и наружную рубашку жидкостью — маслом или водой.

Кожух рентгеновской трубки. Для предотвращения поражения высоким напряжением и облучения рентгеновским излучением обслуживающего персонала трубку помещают в заземленный металлический кожух, содержащий свинец или другой тяжелый материал, ограничивающий рентгеновское излучение.

Материал анода. Материалом анода чаще всего является вольфрам, так как он удовлетворяет следующим требованиям: имеет большое массовое число ($A=184$); обладает высокой температурой плавления ($T=3600^\circ\text{C}$) и теплопроводностью и имеет низкое давление паров.

Для увеличения теплоотвода вольфрамовую мишень приваривают к медному стержню или трубке.

Фокусное пятно — проекция анода трубки в направлении выхода рентгеновского излучения. Для максимального увеличения резкости рентгеновского изображения фокусное пятно должно быть минимальным, однако чрезмерно уменьшать размер анода нельзя ввиду его сильного разогрева. Эту трудность можно преодолеть, применяя наклоненные под 45° мишени в форме эллипса (большая ось эллипса на 40% превосходит малую). При значительной поверхности такой мишени ее проекция в направлении выхода рентгеновского излучения имеет форму круга с диаметром, равным малой оси эллипса.

Вращающийся анод. В отдельных случаях для уменьшения разогрева анода его изготавливают в виде диска, боковая поверхность которого составляет с его основанием угол 45° . Во время работы трубки диск приводится во вращательное движение, а торможение электронов происходит на малом участке боковой поверхности диска.

Двухфокусная трубка. Анод такой трубки имеет два фокусных пятна: большое, позволяющее получать мощный пучок рентгеновского излучения, и малое, дающее

резкое рентгеновское изображение. Однако отечественная промышленность двухфокусные трубки не выпускает.

Выносной анод. Для получения панорамного выхода рентгеновского излучения изготавливают трубки с вынесенным анодом. Такой анод заземляют, а высокое напряжение отрицательной полярности подают на катод. Трубки с вынесенным анодом очень удобны для просвечивания кольцевых швов.

Многосекционная трубка. Максимальное напряжение на аноде рентгеновской трубки ограничено влиянием электрического поля, в результате которого увеличиваются размеры фокусного пятна. Поэтому для получения рентгеновского излучения при напряжениях 400 кВ и более применяют многосекционную трубку. В каждой секции такой трубки имеется специальный электрод, компенсирующий влияние электрического поля анода. Электроны до попадания на анод проходят путь в несколько десятков сантиметров и могут отклоняться от оси трубки. Для предотвращения отклонения электронов в сторону в многосекционной трубке применяют магнитную фокусировку электронного пучка, позволяющую регулировать размер фокусного пятна. Многосекционные трубки могут работать при напряжениях на аноде до 1—2 МВ.

Высоковольтный генератор преобразует напряжение, поступающее из сети, в высокое напряжение, необходимое для питания рентгеновской трубки. В состав высоковольтного генератора входят:

- 1) высоковольтный трансформатор;
- 2) кенотроны для преобразования переменного тока в постоянный;
- 3) конденсаторы для фильтрации и удвоения напряжения;
- 4) трансформаторы накала рентгеновской трубки;
- 5) трансформаторы накала кенотронов;
- 6) выключатели и защитные устройства.

Высоковольтный трансформатор повышает сетевое напряжение 220—380 В до напряжения, необходимого для работы рентгеновской трубки. В низковольтных и средневольтных установках напряжение повышается до 5—400 кВ, а в высоковольтных до 1—2 МВ и более. Высоковольтные трансформаторы должны иметь малый вес и размеры, хорошую теплоотдачу, надежную электриче-

скую изоляцию, а также обеспечивать стабильную работу и необходимую регулировку напряжения. В низковольтных и средневольтных установках средняя точка вторичной обмотки высоковольтного трансформатора заземляется, при этом напряжение между зажимами рентгеновской трубки и землей составляет половину напряжения между анодом и катодом. В ряде случаев более удобно использовать схему, в которой заземлены один из концов вторичной обмотки трансформатора и анод рентгеновской трубки.

В малогабаритных портативных и переносных рентгеновских установках рентгеновскую трубку и высоковольтный трансформатор помещают в общий кожух (блок-трансформатор). Если же трубку и высоковольтный трансформатор размещают в отдельных кожухах, то напряжение от трансформатора к трубке подается по кабелю, имеющему заземленную металлическую оболочку.

Выпрямители напряжения. Высокое напряжение подается на трубку либо непосредственно, либо через выпрямляющую схему. В установках, выполненных в виде блок-трансформатора, выпрямление напряжения осуществляется самой рентгеновской трубкой. В стационарных установках применяют специальные выпрямители на кенотронах. Применение выпрямителей позволяет увеличить выходную мощность установки, так как нагрузка на фокусное пятно становится более равномерной. В новейших конструкциях рентгеновских аппаратов для выпрямления напряжения вместо кенотронов применяют селеновые выпрямители.

Контрольная аппаратура служит для управления рентгеновской установкой и позволяет устанавливать и поддерживать во время работы определенную интенсивность, энергию и продолжительность генерирования рентгеновского излучения. Энергия излучения определяется напряжением на аноде трубки и изменяется при регулировке напряжения в цепи автотрансформатора с помощью реостата. Интенсивность излучения зависит от тока, проходящего через рентгеновскую трубку, величину которого можно изменять регулировкой напряжения накала трубки. Продолжительность работы трубки устанавливается электрическим реле времени.

Кроме того, контрольная аппаратура может включать ряд вспомогательных устройств:

1) стабилизаторы для поддержания тока накала и высокого напряжения постоянными при изменении напряжения сети;

2) устройство для защиты рентгеновской трубки от перегрузки;

3) индикаторы сетевого и высокого напряжения, а также сигнализаторы различных неисправностей и т. д.

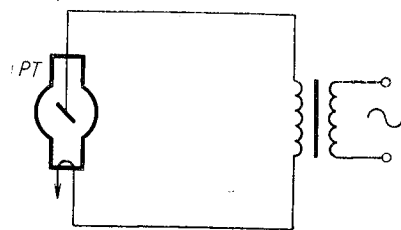


Рис. 7. Полуволновая схема без выпрямителя.

Схемы рентгеновских аппаратов. В зависимости от конструктивного оформления рентгеновского аппарата выбирают наиболее подходящую электрическую схему включения рентгеновской трубки. В современных аппаратах применяют несколько основных схем.

1. Полуволновая схема без выпрямителя наиболее простая (рис. 7). Рентгеновскую трубку *РТ* подключают непосредственно к концам вторичной обмотки, и выпрямление напряжения осуществляется самой трубкой. При таком включении трубка генерирует рентгеновское излучение в течение одного полупериода переменного напряжения, когда на ее аноде находится положительное напряжение. Эту схему применяют в легких переносных аппаратах, выполненных в виде блок-трансформатора.

2. Полуволновая схема с выпрямителем применяется в средних аппаратах (рис. 8). Рентгеновскую трубку *РТ* подключают ко вторичной обмотке высоковольтного трансформатора через кенотрон *К* в схеме с одним выпрямителем (рис. 8, *а*) или через два кенотрона в схеме с заземленной средней точкой вторичной обмотки (рис. 8, *б*). Генерирование рентгеновского излучения происходит в течение положительного полупериода напряжения на аноде трубки.

3. Схема удвоения напряжения с одним кенотроном (рис. 9) позволяет получать напряжение, вдвое превышающее напряжение во вторичной обмотке трансформатора. Во время отрицательного полупериода конденсаторы *С₁* и *С₂* заряжаются через кенотрон *К*, включенный навстречу рентгеновской трубке *РТ*, до максимального

напряжения. С приходом положительного полупериода напряжения конденсаторов складывается с напряжением во вторичной обмотке и на аноде рентгеновской трубки

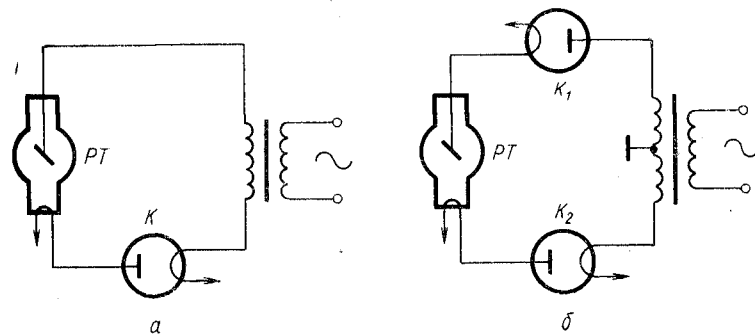


Рис. 8. Полуволновые схемы:

а — с одним кенотроном и заземленным концом вторичной обмотки; *б* — с двумя кенотронами и заземленной средней точкой вторичной обмотки.

оказывается удвоенное напряжение. Схемы удвоения напряжения позволяют получать высокое напряжение без повышения размеров трансформатора и качества его изоляции.

4. Схемы удвоения напряжения с двумя кенотронами, применяемые в современных аппаратах, показаны на рис. 10. Схема Грейнахера (рис. 10, *а*) имеет заземленный конец вторичной обмотки, два кенотрона *К₁* и *К₂*, два конденсатора *С₁* и *С₂* и два сопротивления *Р₁* и *Р₂*. В схеме Вилларда (рис. 10, *б*) заземлена средняя точка вторичной обмотки и имеется также два кенотрона и два конденсатора. Во время отрицательного полупериода напряжения конденсаторы заряжаются через кенотроны до половины амплитудного значения. С приходом положительного полупериода они оказываются включенными последовательно со вторичной обмоткой трансформатора и напряжение на аноде трубки увеличивается в два

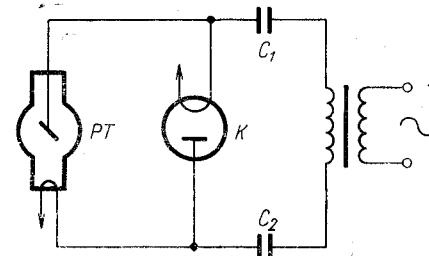


Рис. 9. Схема удвоения напряжения с одним кенотроном.

раза. Генерирование рентгеновского излучения происходит в течение одного полупериода.

5. Схема с постоянным напряжением на аноде. Схема, в которой осуществляется фильтрация пульсирующей

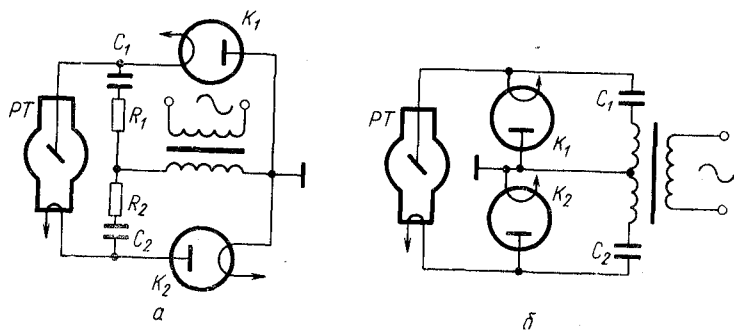


Рис. 10. Схемы удвоения напряжения с двумя кенотронами:
а — схема Грейнахера; б — схема Вилларда.

щего напряжения, показана на рис. 11. В этой схеме напряжение удваивается, выпрямляется и фильтруется, т. е. превращается из пульсирующего в почти постоян-

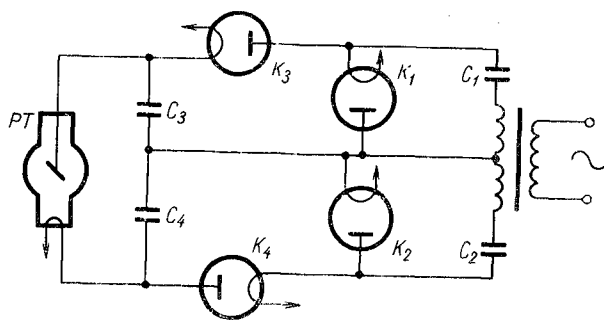


Рис. 11. Схема удвоения с постоянным напряжением на аноде рентгеновской трубки.

ное. Фильтрация напряжения осуществляется конденсаторами C_3 и C_4 , которые заряжаются через кенотроны K_3 и K_4 во время действия положительного полупериода. При этом в трубке генерируется рентгеновское излучение. Во время отрицательного полупериода конденса-

торы C_3 и C_4 продолжают разряжаться через рентгеновскую трубку и тем самым поддерживают генерирование рентгеновского излучения. Для выпрямления напряжения необходимо, чтобы постоянная времени заряда конденсаторов C_3 и C_4 была много меньше постоянной вре-

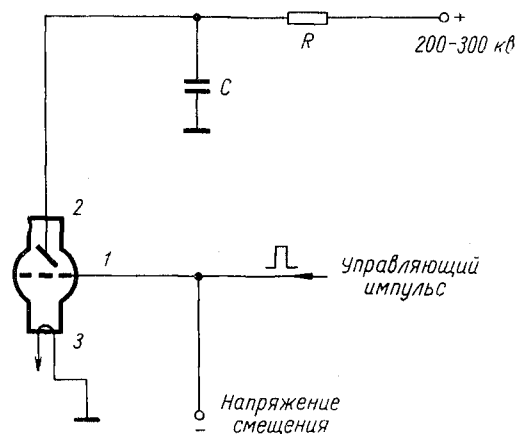


Рис. 12. Схема импульсной рентгеновской трубки:

1 — триггерная сетка; 2 — анод; 3 — катод.

мени разряда. Применение схемы с фильтрацией напряжения позволяет довести нагрузку на рентгеновскую трубку почти до максимального значения и тем самым повысить выходную мощность рентгеновского аппарата.

Кроме того, применение этих схем позволяет получать рентгеновское излучение постоянной энергии и интенсивности.

6. Схема импульсной рентгеновской трубки. Для получения снимков быстро движущихся предметов или быстро протекающих процессов, например вращающегося диска турбины, взрыва и т. п., применяется импульсный метод получения рентгеновского излучения. На рис. 12 представлена упрощенная схема импульсной рентгеновской трубки. Импульсная трубка имеет третий электрод — сетку 1, на который подается электрический управляющий импульс. В нормальном состоянии трубка заперта отрицательным напряжением на управляющей сетке и конденсатор C заряжается через сопротивление R от вы-

Таблица 6

Технические характеристики

Тип аппарата	Напряжение на аноде, кВ	Схема	Тип рентгеновской трубки	Максимальный анодный ток, мА
РУП-60-20-1	10—60	Полуволновая с одним кенотроном, с заземленным анодом	1БПВ-1-60	20
7Л2	70—75	Полуволновая без кенотрона	1БДМ-6-75	10
РУП-120-5-1	50—120	Полуволновая без кенотронов	0,4БПМ-2-120	5
РУП-150-10-1	35—150	Полуволновая с селеновым выпрямителем, заземленным анодом и постоянным напряжением	1,5БПВ-7-150 с вынесенным анодом	10
			0,3БПВ-6-150	2
РУП-200-5-1	70—200	Полуволновая без выпрямителей	0,7БПМ-3-200	5
РУП-200-20-5	70—200	Полуволновая с двумя кенотронами	3БПМ-1-200	20
			1,5БПМ-1-200	
РУП-150/300-10-1	35—150 70—300	Полуволновая с селеновым выпрямителем и постоянным напряжением	1,5БПВ-7-150 с вынесенным анодом	10
			0,3БПВ-6-150	2
			2,5БПМ-4-250	10
РУП-400-5-1	250—400	Полуволновая без выпрямителей с заземленным анодом	1,5БПВ-2-400 1,5БПВ-3-400	5
РУП-1000-2-1	1000	Полуволновая без выпрямителей		2
ИРА-1	220—280	Без выпрямителей, импульсная		

рентгеновских аппаратов

Размер фокусного пятна, мм	Вес аппарата, кг	Напряжение питающей сети, в	Число фаз	Мощность, кат	Конструктивное исполнение аппарата и занимаемое им помещение, м ²
3×3	280	127, 220, 380	1	2,5	Передвижной кабельный, 15
	29	127, 220	1	0,7 просвечивание на экран; 2,0 просвечивание на пленку	Портативный с блок-трансформатором
2×2	Пульт управления—30; блок-трансформатор—45	220, 380	1	2	Портативный с блок-трансформатором, 20 м ²
∅ 5	670	220, 380	3	2,5	Передвижной кабельный, 25
2×2	Пульт управления—30; блок-трансформатор—82	220, 380	1	3	Портативный с блок-трансформатором, 25
∅ 10	750	220, 380	3	7	Передвижной кабельный, 25
4,5×4,5	1000	220, 380	3	5	Передвижной кабельный, 30
∅ 0,3+1,4					
∅ 4					
∅ 5—8	600	220, 380	1	4	Передвижной с блок-трансформатором, 30
	30, с футляром	~ 220 12 (постоянное)		40 20	Портативный с блок-трансформатором

Таблица 7

Область применения рентгеновских аппаратов в дефектоскопии

Рентгеновские аппараты	Напряже- ние на трубке при про- свечива- нии, кВ	Толщина исследуемого материала*, мм			
		Сплавы на основе			
		железа	титана	алюминия	магния
РУП-60-20-1 РУП-120-5-1 РУП-150-10-1	10—60 50—80 35—80	до 4	до 12	до 60	до 80
РУП-120-5-1 РУП-150-10-1 РУП-200-5-1 РУП-200-20-5	50—120 35—140 70—140 70—140	1—20	2—40	5—150	10—200
РУП-150-10-1 РУП-200-5-1 РУП-200-20-5 РУП-150/300-10-1	90—150 90—180 90—180 90—200	2—40	4—70	10—200	15—260
РУП-200-5-1 РУП-200-20-5 РУП-150/300-10-1 РУП-400-5-1	140—200 140—200 140—300 250—400	10—60	15—100	45—250	65—300
РУП-150/300-10-1 РУП-400-5-1 РУП-1000-2-1	250—300 250—400 1000	30—100	50—170	95—300	130—420
РУП-400-5-1 РУП-1000-2-1	250—400 1000	60—200	100—340	190—550	280—820
Бетатрон на 15 Мэв Бетатрон на 25 Мэв Бетатрон на 30 Мэв		100—500	175—800	280—1400	450—2000

* Нижний и верхний пределы толщин контролируемых материалов уточняются в зависимости от технических требований на изделие, производительности контроля, типа рентгеновских трубок, а также пленок и усиливающих экранов.

соковольтного источника напряжения. С приходом на сетку положительного управляющего импульса конденсатор разряжается через рентгеновскую трубку, при этом через трубку протекает сильный ток ~ 2000 — 3000 а и в ней генерируется мощный импульс рентгеновского излучения. Сопротивление R предохраняет источник питания от замыкания на рентгеновскую трубку.

Включение установки синхронизируется с началом изучаемого процесса, а получаемое изображение регистрируется на рентгеновской пленке. При изучении быстропеременных процессов экспозиция продолжается в течение одного импульса, длительность которого определяется величиной емкости C и внутренним сопротивлением трубки, и имеет порядок $0,2$ — 2 мксек. Импульсные рентгеновские установки можно применять и в обычной радиографии.

Возможен и иной принцип действия импульсного рентгеновского аппарата, при котором применяется импульсный высоковольтный трансформатор. Вторичная обмотка этого трансформатора замкнута на рентгеновскую трубку, а на первичную подается кратковременный импульс напряжения.

Типы рентгеновских аппаратов. В зависимости от области применения рентгеновские аппараты по конструктивному оформлению подразделяются на два типа: переносные (портативные, выполненные в виде блок-трансформатора) и передвижные (лабораторные). Основные конструктивные и технические характеристики рентгеновских аппаратов, выпускаемых отечественной промышленностью, приводятся в табл. 6.

Выбор рентгеновского аппарата. Для исследования материалов и изделий без разрушения выпускаются рентгеновские аппараты различных конструкций и мощностей. Каждый тип рентгеновского аппарата в зависимости от конструктивных и технических характеристик имеет свою область применения. Выбор типа рентгеновского аппарата определяется следующими параметрами:

- 1) плотностью и толщиной материала контролируемого изделия;
- 2) скоростью проведения контроля и количеством рентгенограмм в единицу времени;
- 3) конфигурацией контролируемой детали или изделия;

4) технологией контроля, т.е. контролируемый объект подводится к аппарату или аппарат подводится к объекту.

Плотность и толщина контролируемого материала определяет в основном необходимые напряжения на аноде трубки. Скорость проведения контроля зависит от того, насколько аппарат приспособлен для данного контроля, но в основном определяется мощностью аппарата. Мощность аппарата выбирают таким образом, чтобы длительность экспозиций не превышала 10—15 мин при напряжении до 200 кв и 30 мин при напряжении до 400 кв. От конфигурации контролируемого изделия и технологии проведения контроля зависит выбор веса установки. В конкретных производственных условиях каждый из этих параметров может оказаться решающим при выборе рентгеновского аппарата, даже в том случае, если данный аппарат не вполне удовлетворяет остальным параметрам. В табл. 7 приводится допустимая толщина просвечивания изделий из сплавов на основе железа, титана, алюминия и магния в зависимости от типа рентгеновских аппаратов. Нижний предел толщины просвечиваемых материалов определяется чувствительностью, достигаемой при просвечивании при наименьших напряжениях¹, верхний—допустимой длительностью экспозиций просвечивания.

Портативные рентгеновские аппараты

РУП-120-5-1 — рентгеновская установка промышленная портативная, предназначена для просвечивания материалов в лаборатории, в цехе, на строительной площадке и в полевых условиях для контроля магистральных трубопроводов при температуре окружающего воздуха от -10° до $+35^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности до 80%.

Аппарат работает по полуволновой схеме с заземлением средней точки без выпрямителей во вторичной цепи.

Режимы работы.

1. Без водяного охлаждения работа с перерывами в

¹ Как показано ниже, чувствительность ухудшается при уменьшении толщины просвечиваемого материала. Поэтому при просвечивании очень малых толщин она может достигать такой величины, которая не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к контролю.

течение 12 ч (на 15—20 мин работы в номинальном режиме 1 ч перерыва).

2. С водяным охлаждением в номинальном режиме при расходе воды 4—5 л/мин непрерывная работа в те-

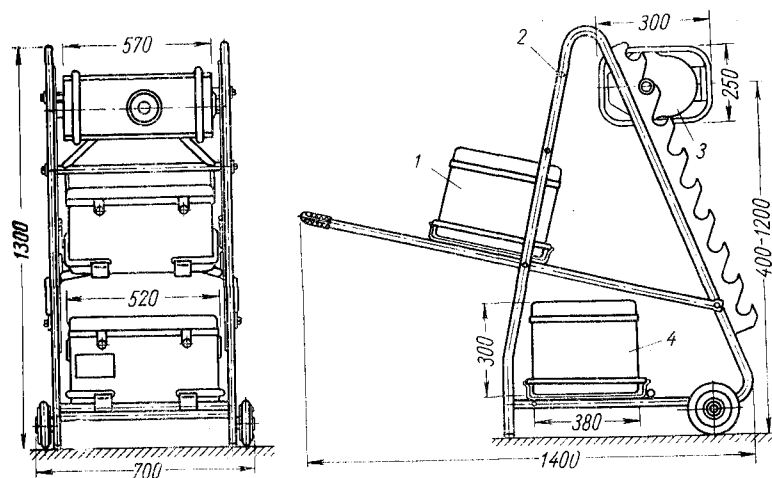


Рис. 13. Общий вид рентгеновского аппарата РУП-120-5-1:

1—ящик с соединительными кабелями, водопроводным шлангом и спецшнуром; 2—штатив-тележка; 3—блок-трансформатор; 4—пульт управления.

чение 3—4 ч. Общий вид и габариты аппарата показаны на рис. 13. Штатив-тележка позволяет устанавливать блок-трансформатор по высоте в пределах 40—120 см и поворачивать блок-трансформатор вокруг своей оси на любой угол с фиксацией.

Вспомогательный штатив на роликах ($572 \times 390 \times 562$ мм) позволяет производить просвечивание сварных швов на горизонтальной, вертикальной или наклонной плоскостях с фокусным расстоянием 40 см, а также просвечивание изнутри трубопроводов с диаметрами 700, 800 и 1000 мм. Длина кабеля между блок-трансформатором и пультом управления 30 м.

РУП-200-5-1 — рентгеновская установка промышленная портативная. По назначению и по конструкции аналогична аппарату РУП-120-5-1.

ИРА-1 — переносной импульсный рентгеновский аппарат. Предназначен для исследования быстротекающих процессов в непрозрачной среде, дефектоскопии

сварных соединений в труднодоступных местах, в частности дефектоскопии магистральных трубопроводов в полевых условиях, контроля фотоумножителей и для ряда других специальных задач.

Аппарат питается от сети переменного тока 220 в 50 гц или от сети постоянного тока 12 в (аккумуляторов).

Потребляемая аппаратом мощность не более 40 вт при питании от сети переменного тока и не более 20 вт при питании от сети постоянного тока.

Амплитуда импульса высокого напряжения на рентгеновской трубке 220—280 кв. Длительность импульса высокого напряжения порядка 1 мксек.

Толщина стали, просвечиваемая за один импульс при фокусном расстоянии 25 см с применением усиливающих экранов УФД-П/2, равна 15 мм. Интервал между импульсами не более 15 сек.

Габариты аппарата: высоковольтный блок аппарата $\varnothing 180 \times 520$ мм; пульт управления $130 \times 170 \times 310$ мм; аппарат с упаковочным футляром весит около 30 кг.

Лабораторные передвижные аппараты

РУП-60-20-1 — рентгеновская установка промышленная передвижная (рис. 14), предназначена для просвечивания легких сплавов (алюминия, магния) и неметаллических материалов в цеховых и лабораторных условиях. Трубка снабжена бериллиевым окном для уменьшения фильтрации длинноволновой части спектра излучения. Анод охлаждается проточной водой. Реле времени рассчитано на 6 мин.

РУП-200-20-5 — рентгеновская установка промышленная передвижная. Предназначена для просвечивания материалов и изделий в цеховых и лабораторных условиях. Анод охлаждается маслом, поступающим от масляного насоса. Реле времени рассчитано на 30 мин. Габариты установки приводятся на рис. 15.

РУП-150-10-1 — рентгеновская установка промышленная передвижная. Предназначена для просвечивания материалов и изделий в условиях рентгенодефектоскопической лаборатории. Установка состоит из следующих узлов (рис. 16):

- 1) генераторного устройства 3 на 150 кв;
- 2) двух рентгеновских трубок в защитных кожухах

1 и 6 на 150 кв, присоединяемых к генераторному устройству с помощью высоковольтного кабеля длиной 10 м;

3) пульта управления 2;

4) штатива с треногим основанием на роликах 4.

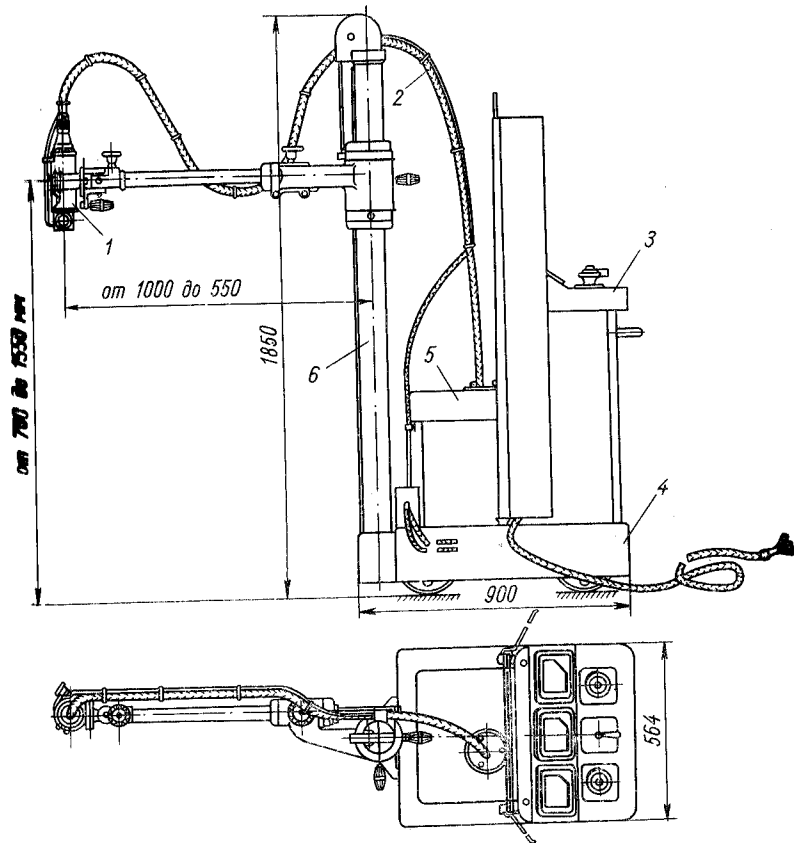


Рис. 14. Общий вид рентгеновского аппарата РУП-60-20-1:

1 — защитный кожух с рентгеновской трубкой; 2 — высоковольтный кабель; 3 — пульт управления; 4 — тележка; 5 — генераторное устройство; 6 — штатив.

Аппарат РУП-150-10-1 работает по схеме выпрямления с постоянным напряжением на аноде рентгеновской трубки и заземленным анодом. В генераторном устройстве применены селеновые выпрямители, которые обес-

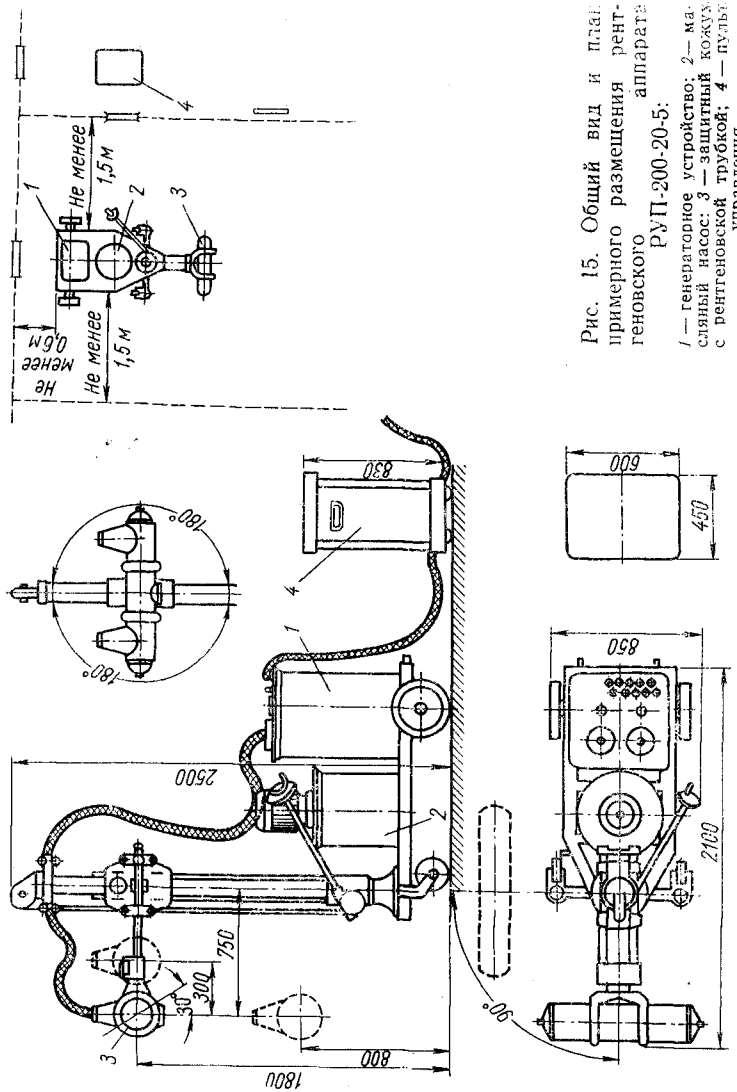


Рис. 15. Общий вид и план примерного размещения рентгеновского аппарата РУП-200-20-5:
 1 — генераторное устройство; 2 — главный насос; 3 — защитный кожух с рентгеновской трубкой; 4 — пульт управления.

печивают более надежную работу по сравнению с кенотропами.

Применение трубки с вынесенным заземленным анодом позволяет производить панорамное просвечивание

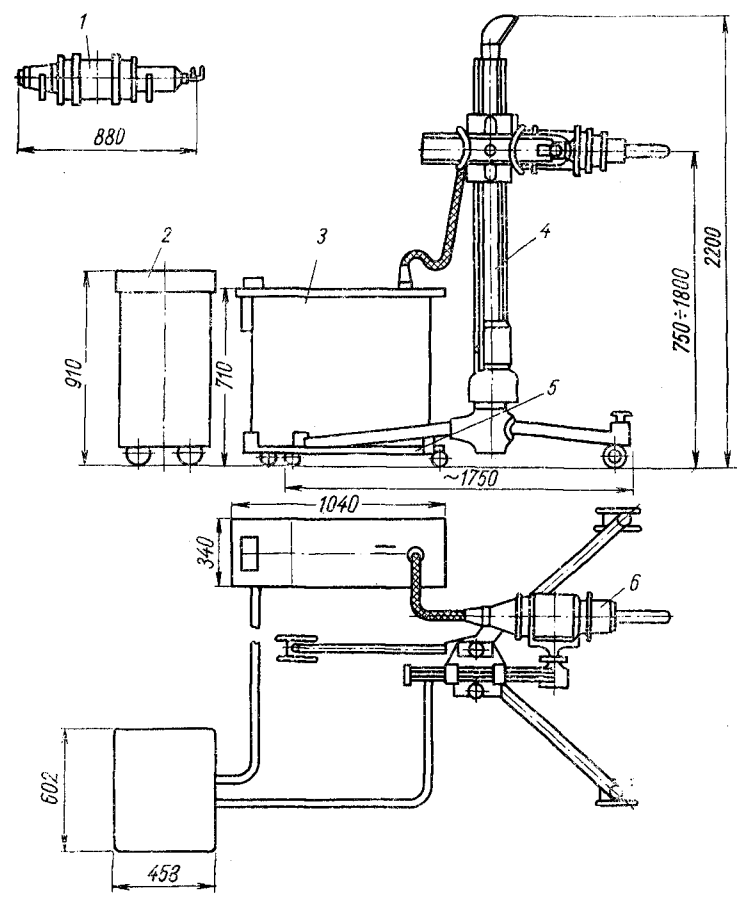


Рис. 16. Общий вид рентгеновского аппарата РУП-150-10-1:
 1 — защитный кожух острогофокусной трубки; 2 — пульт управления; 3 — генераторное устройство катодное; 4 — штатив; 5 — тележка; 6 — защитный кожух с трубкой с выносным анодом.

полых деталей и труб. Острофокусная трубка дает возможность получать высококачественные радиограммы контролируемых материалов и изделий, на которых хо-

рошо выявляются мелкие дефекты. Охлаждение анодов трубок водяное.

Пределы плавного регулирования напряжения от 35 до 80 кВ и от 70 до 150 кВ, анодный ток изменяется че-

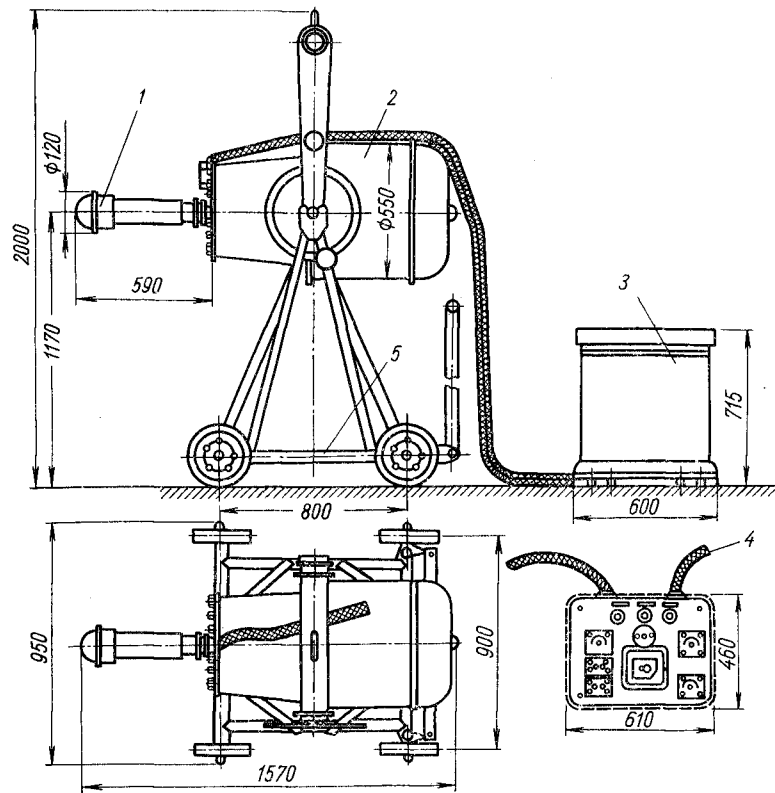


Рис. 17. Общий вид рентгеновского аппарата РУП-400-5-1:
1 — защитный кожух; 2 — блок-трансформатор; 3 — пульт управления; 4 — сеть;
5 — тележка.

рез 1 ма от 1 до 10 ма. Пульт управления выполнен в виде тумбочки на роликах. Габариты аппарата 1500×1700×2200 мм.

РУП-150/300-10-1 — рентгеновская установка промышленная передвижная. Назначение и исполнение аналогичны аппарату РУП-150-10-1. В аппарате РУП-150/300-10-1 используются два генераторных уст-

ройства на 150 кВ каждое — анодное и катодное с заземлением средней точки. Аппарат комплектуют тремя рентгеновскими трубками. Пределы плавного регулирования напряжения от 70 до 160 кВ и от 140 до 300 кВ, анодный ток изменяется через 1 ма от 1 до 10 ма. Аппарат можно использовать с одним генераторным устройством подобно аппарату РУП-150-10-1.

РУП-400-5-1 — рентгеновская установка промышленная передвижная (рис. 17). Предназначена для просвечивания материалов и изделий большой толщины в цеховых и лабораторных условиях. Электронный пучок фокусируется магнитной линзой, диаметр фокусного пятна регулируется от 5 до 12 мм. Выход излучения в виде конического пучка с углом расхождения 40° или по всей окружности для панорамного просвечивания. Реле времени позволяет устанавливать экспозиции длительностью до 30 мин. Анод охлаждается проточной водой. Длина кабеля между пультом управления и блок-трансформатором — 10 м.

РУП-1000-2-1 — рентгеновская установка промышленная передвижная. Назначение то же, что и РУП-400-5-1.

Обзор зарубежной рентгеновской техники дан в работе [10].

2. Линейные ускорители и бетатроны [15]

Повышение напряжения при ускорении электронов позволяет увеличивать энергию тормозного излучения. Увеличение энергии излучения в значительной мере повышает скорость исследования и позволяет увеличить толщину исследуемого материала. Для получения тормозного излучения высокой энергии (от 1 до 30 МэВ) в дефектоскопии могут применяться линейные или циклические (индукционные) ускорители электронов.

Линейный ускоритель электрона. Линейный ускоритель состоит из электронной пушки, источника энергии и медного волновода. С помощью высокочастотного генератора в волноводе создается бегущая электромагнитная волна, электрическое поле которой направлено по оси волновода. Электроны инжектируются электронной пушкой в волновод, ускоряются электрическим полем бегущей волны и попадают в конце пути на мишень, в которой возникает тормозное излучение. На каждые 30 см

пути в волноводе электронам сообщается энергия примерно в 1 Мэв . При среднем анодном токе ускорителя $15\text{--}30 \text{ мка}$ интенсивность излучения на расстоянии 1 м от ускорителя может достигать $100\text{--}200 \text{ р/мин}$. В качестве генератора высокой частоты применяются магнетроны или клистроны. Линейные ускорители позволяют ускорять электроны до энергии $3\text{--}10 \text{ Мэв}$ и более, но в дефектоскопии широкого применения не получили ввиду сложности изготовления.

Бетатрон. Бетатрон предназначен для ускорения электронов, движущихся по круговым орбитам под действием магнитного поля, состоит из электромагнита и тороидальной вакуумной камеры, расположенной между полюсами электромагнита. Ускорение электронов происходит в вихревом электрическом поле, которое индуцируется в ускорительной камере переменным магнитным полем.

Изменяющееся во времени магнитное поле создает в окружающем пространстве вихревое электрическое поле, силовые линии которого располагаются в плоскости, перпендикулярной вектору напряженности магнитного поля, и образуют относительно этого вектора концентрические окружности. Напряженность электрического поля по всей длине силовой линии остается постоянной и в современных бетатронах достигает 2 в/см . Если электрон движется вдоль силовой линии, то он ускоряется электрическим полем и его энергия увеличивается на величину, равную произведению заряда электрона на напряженность электрического поля.

Приращение энергии электрона за один полный оборот невелико и в современных бетатронах при длине круговой орбиты примерно 1 м составляет $15\text{--}20 \text{ эв}$. Однако если в течение некоторого времени удерживать электрон на круговой орбите, то он может совершить около миллиона оборотов и ускориться до энергии 100 Мэв . Для удержания электронов на круговой орбите в бетатроне используется то же самое магнитное поле, что и для создания ускоряющего электрического поля. Как известно, электрон, попавший в магнитное поле, движется под действием этого поля по окружности, называемой равновесной орбитой. Радиус равновесной орбиты определяется из условия равенства двух сил, действующих на электрон в противоположных направлениях: лоренцевой силы, возникающей при движении

электрона в магнитном поле и заставляющей двигаться его по круговой орбите, и центробежной силы, возникающей при движении электрона по окружности. Радиус равновесной орбиты пропорционален энергии электрона (его скорости) и обратно пропорционален напряженности магнитного поля. Таким образом, для того чтобы в течение всего процесса ускорения электрон находился на равновесной орбите, необходимо выполнение условия: скорость приращения энергии электрона должна равняться скорости нарастания напряженности магнитного поля. Это условие выполняется лишь тогда, когда отношение магнитного потока через площадь, ограниченную равновесной орбитой, к величине этой площади численно равно удвоенной напряженности магнитного поля на орбите.

Параметры бетатрона выбираются таким образом, чтобы равновесная орбита находилась внутри вакуумной камеры. Для предотвращения отклонения электронов с равновесной орбиты в вертикальном направлении (расфокусировки электронного пучка) вектор напряженности магнитного поля на равновесной орбите имеет небольшую горизонтальную составляющую. Электроны вводятся в вакуумную камеру в тангенциальном направлении (по касательной к равновесной орбите) с помощью электронной пушки-инжектора. Инжекция электронов синхронизируется с началом периода переменного напряжения питающего электромагнит бетатрона, и весь процесс ускорения длится в течение одной четверти периода¹. По окончании процесса ускорения электроны выводятся на другую орбиту и попадают на платиновую мишень, в которой возникает тормозное излучение.

Энергетический спектр тормозного излучения бетатрона. При торможении ускоренных электронов в мишени возникает тормозное излучение с непрерывным энергетическим спектром. Максимум интенсивности излучения находится в области малой энергии квантов тормозного излучения до $1\text{--}2 \text{ Мэв}$. С увеличением энергии квантов тормозного излучения интенсивность излучения постепенно уменьшается и круто спадает до нуля в области максимальных энергий. Максимальная

¹ В некоторых типах бетатронов ускорение электронов осуществляется в течение двух четвертей периода — первой и третьей.

энергия тормозного излучения немного меньше максимальной энергии ускоренных электронов. С увеличением максимальной энергии тормозного излучения $E_{\text{макс}}$ интенсивность излучения бетатрона увеличивается пропорционально $E_{\text{макс}}^3$. Эффективная энергия излучения бетатрона зависит от максимальной энергии и находится в пределах $0,3-0,5 E_{\text{макс}}$.

Угловое распределение излучения бетатрона. Излучение бетатрона распространяется в пределах определенного телесного угла в виде пучка, имеющего осевую симметрию. Максимальное значение интенсивности излучения наблюдается на оси пучка, и оно спадает симметрично оси пучка с увеличением раствора угла. Раствор телесного угла, при котором интенсивность излучения уменьшается в два раза по сравнению с интенсивностью на оси пучка, называется углом половинной интенсивности. Угол половинной интенсивности уменьшается обратно пропорционально энергии тормозящихся электронов и возрастает с увеличением толщины мишени. Чем больше энергия излучения бетатрона при оптимальной толщине мишени, тем меньше угол половинной интенсивности и тем острее направлено излучение. При энергии излучения 15 Мэв угол половинной интенсивности равен $\pm 6,3^\circ$, а при энергии излучения 30 Мэв — составляет всего $\pm 3,3^\circ$. Для регулирования площади поперечного сечения пучка тормозного излучения применяют сменные коллиматоры — свинцовые втулки с отверстиями различного диаметра.

Неоднородность пучка бетатронного излучения в поперечном направлении особенно заметно проявляется в бетатронной радиографии. Оптическая плотность снимка в центре значительно превосходит оптическую плотность на его краях, так как распределение оптической плотности снимка повторяет распределение интенсивности излучения в пучке. Для получения одинаковой интенсивности излучения по фронту пучка применяют специальные выравнивающие фильтры, вставляемые в коллиматор. Выравнивающий фильтр изготавливают из меди в виде усеченного конуса. Выравнивание интенсивности излучения достигается за счет того, что излучение в направлении оси конуса ослабляется сильнее, чем излучение, распространяющееся под углом.

Стабилизация энергии и интенсивности излучения бетатрона. В радиометрических методах радиационной де-

фектоскопии для регистрации ионизирующих излучений применяют ионизационные камеры, газоразрядные и сцинтилляционные счетчики. Величина выходного сигнала ионизационных камер и газоразрядных счетчиков зависит от интенсивности излучения, а в сцинтилляционных счетчиках — от энергии излучения. Чтобы не возникало ложных сигналов, которые можно спутать с наличием дефектов, необходимо при просвечивании контролируемых предметов иметь излучение со стабильной интенсивностью и энергией. Для поддержания постоянными интенсивности и энергии излучения при изменении амплитуды питающего напряжения в бетатронах применяют специальные стабилизирующие схемы. Стабилизацию интенсивности излучения осуществляют корректировкой момента инжекции электронов в ускорительную камеру, а стабилизацию энергии — корректировкой момента сброса электронов на мишень в зависимости от амплитуды переменного напряжения, питающего электромагнит. Для дефектоскопии пригодно излучение, интенсивность и энергия которого стабилизируются с точностью до $\pm 1\%$ при колебаниях напряжения в питающей сети $\pm 10\%$.

Типы бетатронов для дефектоскопии. В последние годы заметно повысился интерес к бетатронной дефектоскопии, так как применение бетатронов для контроля качества промышленных изделий позволяет существенно расширить возможности методов радиационной дефектоскопии и повысить их производительность. В табл. 8 приводятся основные характеристики бетатронов конструкции ТПИ с воздушной системой охлаждения.

Область применения бетатронов. Тормозное излучение бетатронов используют для контроля изделий и материалов большой толщины. Для большинства материалов в области энергий излучения $5-30 \text{ Мэв}$ линейный коэффициент ослабления излучения достигает минимального значения, поэтому становится возможным контроль изделий и материалов, толщина которых равняется десяти слоям половинного ослабления излучения, что составляет для стали ($\rho = 7,87 \text{ г/см}^3$) $\sim 300 \text{ мм}$, для алюминия ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$) $\sim 800 \text{ мм}$ и для магния ($\rho = 1,74 \text{ г/см}^3$) $\sim 1200 \text{ мм}$. Так как линейный коэффициент ослабления излучения в области энергий излучения от 10 до 30 Мэв слабо зависит от энергии излучения, то увеличение энергии излучения почти не влияет

Основные характеристики бетатронов конст

Параметр	Тип		
	ПМБ-3 (перенос- ной)	ПМБ-5 (перенос- ной)	ПМБ-6 (перенос- ной)
Максимальная энергия, Мэв	3	5	6
Пределы регулирования энергии, Мэв	0,5—3	1—5	2—6
Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м от мишени, р/мин	0,05	0,1	0,3
Стабильность мощности дозы при измене- нии питающего напряжения на ±10%, не более %	2	2	2
Потребляемая мощность, кат	0,7	—	1,2
Реактивная мощность конденсаторной ба- тарей, кат	14	—	17,8
Продолжительность непрерывной рабо- ты, ч	0,25	0,25	0,25
Габариты электромагнита (или блока-из- лучателя переносного бетатрона), мм	385×300× ×165	286×180× ×150	430×330× ×150
Вес электромагнита (или блока-излучателя переносного бетатрона), кг	30	26	80
Габариты пульта управления, мм	200×130× ×100	510×380× ×195	510×380× ×195
Вес пульта управления, кг	0,5+5	8+12	8+12
Габариты блока питания, мм	600×450× ×170	510×380× ×170	510×380× ×170
Вес блока питания, кг	35	29	129

Примечание. Частота питающего напряжения 50 гц.

Таблица 8

рукции Томского политехнического института

бетатронов						
Б-9	Б-15	Б-25	Б-25/10 (много- сточный)	Б-30	Б-30 (двух- лучевой)	Б-35
9	15	25	25	30	30	35
2—9	2—15	3—25	3—25	3—30	3—30	3—35
4	8	40	40	150—200	2×150	250
2	2	2	1,5	1,5	2	1,5
3,5	4	20	15	40	40	50
560	680	980	800	1800	1800	1820
16	8	8	16	16	16	16
1200×1000× ×1100	1200×950× ×1000	1200×1500× ×1250	1200×1200× ×1200	1200×1700× ×1300	1200×1700× ×1300×	1510×1370× ×1010
750	1200	3000	2500	5000	5000	4000
1000×1000× ×1500	1500×1500× ×1700	1500×1500× ×1700	1000×1000× ×1500	1500×1500× ×1700	1500×1500× ×1500	1300×900× ×1050
250	250	300	250	300	300	350

на толщину просвечиваемого материала и на выявляемость дефектов.

Однако с увеличением максимальной энергии тормозного излучения $E_{\text{макс}}$ интенсивность излучения бетатрона увеличивается как $E_{\text{макс}}^3$, что дает возможность либо повысить производительность контроля, либо увеличить толщину просвечиваемого материала до 16—17 слоев половинного ослабления (что для стали составляет ~ 500 мм) при энергии излучения $E_{\text{макс}}$, равной 30 Мэв. Нижний предел толщины материалов, просвечиваемых тормозным излучением бетатронов с энергией 10—30 Мэв, равен одному слою половинного ослабления излучения (30 мм для стали) при радиографировании или определяется необходимой разрешающей способностью, достигаемой в понижационных методах контроля.

Выбор бетатрона. Конструкция бетатрона, предназначенного для контроля качества материалов и изделий, должна отвечать техническим, эксплуатационным и экономическим требованиям. Технические требования определяются толщиной и плотностью контролируемых материалов и изделий, чувствительностью и производительностью метода контроля и методом регистрации дефектов. Эксплуатационные условия зависят от места расположения и маневренности бетатрона, от длительности непрерывной работы и температуры окружающей среды. Экономические требования определяются стоимостью установки, эксплуатационными расходами и затратами на биологическую защиту. Эти требования определяют параметры бетатрона, от которых в свою очередь зависит выбор типа бетатрона.

Микротрон. В настоящее время для ускорения электронов появилась реальная возможность использовать новое устройство — микротрон, идея которого была предложена В. И. Векслером еще в 1944 г.

Принцип работы микротрона отчасти аналогичен принципу работы циклотрона. В циклотроне заряженные частицы — протоны — ускоряются переменным электрическим полем, которое создается между полыми полудисками — дуантами. Для того чтобы частица периодически попадала в ускоряющее поле, ее заставляют двигаться по окружности, помещая дуанты в магнитное поле, перпендикулярное плоскости дуантов. Каждый раз, когда частица пролетает в электрическом поле, она получает дополнительную энергию и скорость ее увели-

чивается. Одновременно увеличивается и радиус орбиты частицы, так что время движения частицы по круговой орбите не изменяется, т. е. циклотронная частота остается постоянной. Но это положение справедливо лишь до тех пор, пока ускоряемая частица обладает малой энергией. При большой энергии начинает проявляться релятивистский эффект зависимости массы частицы от ее скорости. Это вызывает изменение циклотронной частоты, вследствие чего нарушается условие резонанса и частица перестает ускоряться. Таким образом, в циклотроне на протяжении всего цикла ускорения подерживается равенство двух частот: частоты переменного электрического напряжения и частоты обращения частицы по круговой орбите.

В микротроне ускоряются электроны. Вследствие малой массы для электронов релятивистские эффекты становятся заметными уже при энергиях в несколько килоэлектронвольт. Поэтому циклотронный принцип ускорения электронов не позволяет получить высоких энергий. В микротроне изменение частоты обращения электронов по орбите учитывается соответствующим подбором частоты электрического поля. При этом время обращения электрона по орбите кратно периоду переменного электрического напряжения, благодаря чему электрон на протяжении всего периода ускорения находится в ускоряющем электрическом поле. Микротрон позволяет ускорять электроны до энергий в несколько десятков и даже сотен мегаэлектронвольт. Так же как и бетатрон, он может быть использован в качестве мощного источника ионизирующего излучения, возникающего при торможении ускоренных электронов в мишени. Однако от бетатрона микротрон выгодно отличает его значительно меньшие размеры, дешевизна и простота. При диаметре около 1 м микротрон позволяет ускорять электроны до нескольких десятков или сотен мегаэлектронвольт при токе в импульсе до 100 ма.

Можно полагать, что в недалеком будущем микротрон найдет широкое применение в дефектоскопии.

3. Гамма-аппараты [10, 16, 35]

Гамма-аппараты предназначены для контроля качества материалов и изделий путем просвечивания их γ -излучением радиоактивных изотопов и применяют их

в тех случаях, когда по техническим или экономическим причинам применение рентгеновских аппаратов нецелесообразно или вообще невозможно.

Существующие гамма-аппараты делятся на два вида — переносные и передвижные. Переносные гамма-аппараты обладают большой маневренностью и используются для контроля изделий в полевых, стапельных, цеховых условиях и в других труднодоступных местах. Как правило, такие установки выполнены в виде отдельных элементов и быстро приводятся в рабочее состояние. Передвижные гамма-аппараты предназначены для контроля материалов и изделий в цеховых и лабораторных условиях. Гамма-аппараты должны удовлетворять эксплуатационным требованиям и одновременно обеспечивать безопасную работу с радиоактивными источниками γ -излучения. Основными частями гамма-аппарата являются защитный контейнер-манипулятор (радиационная головка), механизм управления установкой и штатив.

Защитный контейнер. В передвижных установках, использующих источники большой активности, имеется два защитных контейнера — рабочий и контейнер-хранилище. Рабочий контейнер предназначен для размещения в нем источника излучения во время просвечивания и обеспечивает направленный выход конического пучка излучения. Контейнер-хранилище предназначен для хранения источника излучения в нерабочем состоянии.

Источник излучения перемещается из контейнера-хранилища в рабочий контейнер по специальному ампулопроводу посредством механизма управления. В переносных гамма-аппаратах для обеспечения выхода конического пучка излучения и для хранения источника излучения в нерабочем состоянии используют один и тот же контейнер. В этом случае защитный контейнер-манипулятор снабжается затвором, перекрывающим пучок излучения по окончании просвечивания. Управление затвором осуществляется манипулятором с ручным или механическим приводом. В некоторых типах гамма-аппаратов предусмотрен вывод источника излучения из контейнера-манипулятора для панорамного просвечивания мелких деталей и сварных швов трубопроводов. Защитные контейнеры изготовляют из плотных материалов, хорошо поглощающих γ -излучение, например из вольфрама, свинца, урана, они обеспечивают

Таблица 9

Основные характеристики гамма-аппаратов

Тип аппарата	Источник излучения	Максимальная активность источника, э-экв Ra	Диаметр активной части источника, мм	Габариты, мм	Вес, кг	Завод-изготовитель или разработчик
РК-2	Tm ¹⁷⁰ Se ⁷⁵ I ¹⁹² Cs ¹³⁷	0,7 2,0 5,0 2,0	9,0 5,0 2,0 5,0	1720×1700×1700	40, со штативом— 80	Изготавливаются по спецзаказам
УГД-3 (в головке могут находиться три источника) РИД-21	Tm ¹⁷⁰ Se ⁷⁵ Cs ¹³⁷ I ¹⁹² Tm ¹⁷⁰ Se ⁷⁵ I ¹⁹² Cs ¹³⁷	0,5 2,0 2,0 5,0 0,5 2,0 2,0 2,0	9,0 5,0 5,0 2,0 9,0 5,0 2,0 5,0	1200×810×1800	400	То же
РИД-22	Cs ¹³⁷	20,0	10×11 (пластины)	Радиационная головка— 180×200×420	Радиационная головка—26, пульта управления—8 Радиационная головка—55	—
«Газпром» «Бетон»	Cs ¹³⁷ Tm ¹⁷⁰ I ¹⁹² Cs ¹³⁷	2,0 0,5 5,0 2,0	5,0 9,0 2,0 5,0	—	Общий—39,5 Общий—107	—

Тип аппарата	Источник излучения	Максимальная активность источника, $e^{-экв}$ Ra	Диаметр активной части источника, мм	Габариты, мм	Вес, кг	Завод-изготовитель или разработчик
«Грасса» «Лабиринг»	Cs^{137}	2,0	5,0	—	—	—
	Tm^{170}	0,5	9,0			
	Ir^{192}	5,0	2,0			
	Cs^{137}	2,0	5,0			
«Нева»	Cs^{137}	20,0	10×11	700×350×900	11,0, со штативом—18,0	«Мосрентген»
	Tm^{170}	0,5	9,0			
ГУП-Тм-0,5-3	Se^{75}	2,0	5,0	700×350×900	13,0, со штативом—20,0	»
ГУП-Ir-5-2	Ir^{192}	5,0	2,0	1400×1400×2800	220	»
ГУП-Co-0,5-2	Cs^{137}	2,0	5,0			
ГУП-Co-0,5-2	Co^{60}	0,5	5×5	1610×1600×2200	650	»
	Cs^{137}	20,0	10×11 (пластины)			
ГУП-Co-5-2	Co^{60}	5,0	5×5 (пластины)	1600×1600×2200	750	»
ГУП-Co-50-2	Co^{60}	50,0	5,0			

ослабление интенсивности излучения радиоактивных источников до предельно допустимой нормы.

Механизм управления. Механизм управления гамма-аппаратом осуществляет следующие операции: перемещение источника излучения в положение «просвечивание», управление работой затвора контейнера-манипулятора и возвращение источника в положение «хранение» по истечении времени экспозиции. В простейших переносных установках для управления применяют ручные манипуляторы, а длительность экспозиции определяют по часам. В более совершенных гамма-аппаратах управление положением источника излучения или затвором контейнера-манипулятора осуществляется механическим манипулятором, а длительность экспозиций устанавливается с помощью реле времени. Дистанционный привод позволяет управлять установкой на расстоянии 5—10 м. В систему управления могут входить радиометрические сигнализаторы положения источника излучения. В гамма-аппаратах с механическим управлением, как правило, предусматривается аварийная система возвращения источника излучения в положение «хранение» на случай внезапного прекращения подачи питающего напряжения.

Штатив. Для размещения гамма-аппарата в месте проведения контроля его устанавливают на штатив. Легкие разборные штативы переносных аппаратов придают им большую маневренность и позволяют контролировать изделия в самых различных положениях и труднодоступных местах. Передвижные установки собираются на стационарных штативах.

Типы гамма-аппаратов. Отечественной промышленностью выпускаются различные типы переносных и передвижных гамма-аппаратов. Основные характеристики гамма-аппаратов для просвечивания изделий приводятся в табл. 9.

Область применения гамма-аппаратов. Область применения гамма-аппаратов определяется энергией излучения и активностью радиоактивных источников излучения, применяемых в этих установках. В табл. 10 приводится толщина просвечиваемых материалов и изделий для каждого типа установки. Область применения гамма-аппаратов зависит также от их конструктивных особенностей и маневренности. Выбор гамма-аппаратов с соответствующими радиоактивными источниками излу-

Таблица 10

Область применения радиоактивных источников и гамма-аппаратов в дефектоскопии

Радиоактивные источники	Гамма-аппараты	Толщина исследуемого материала, * мм				
		Сплавы на основе				Пластмассы и близкие к ним по плотности материалы
		железа	титана	алюминия	магния	
^{152}Eu	РК-2; РИД-21	до 4	до 12	до 60	до 80	до 100
^{170}Tm	РК-2; РИД-21; УГД-3; ГУП-Тм-0,5-3	1—20	2—40	5—150	10—200	50—250
^{75}Se	РК-2; РИД-21; ГУП-Тм-0,5-3; ГУП-Іг-5-2; УГД-3	2—40	4—70	10—200	15—260	70—300
^{192}Ir	ГУП-Іг-5-2; РК-2; РИД-21; УГД-3	10—60	15—100	45—250	65—300	120—400
^{137}Cs ^{152}Eu	УГД-3; ГУП-Сс-0,5-2; ГУП-Со-5-2	30—100	50—170	95—300	130—420	150—550
^{60}Co	ГУП-Со-5-2; ГУП-Сс-50-2	60—200	100—340	190—550	280—820	300—850

* Нижний и верхний пределы толщины контролируемых материалов уточняются в зависимости от технических требований на изделие, производительности и условий контроля.

чения для решения конкретной производственной задачи определяется толщиной и плотностью материала, подлежащего контролю, технологией проведения контроля и в основном аналогичен выбору рентгеновских аппаратов.

ГУП-Тм—0,5-3 — переносной гамма-аппарат, предназначен для просвечивания сварных швов и других изделий в лабораторных, цеховых, стапельных и полевых условиях, а также может быть использован в труднодоступных местах различных конструкций. Габаритные размеры аппарата показаны на рис. 18. Просвечивание осуществляется коническим пучком излучения с углом расхождения 53° . В комплект аппарата входят:

- 1) защитный контейнер с затвором (рис. 19);
- 2) приспособление для перезарядки (манипулятор);
- 3) штатив (складной);
- 4) центратор для определения направления просвечивания;

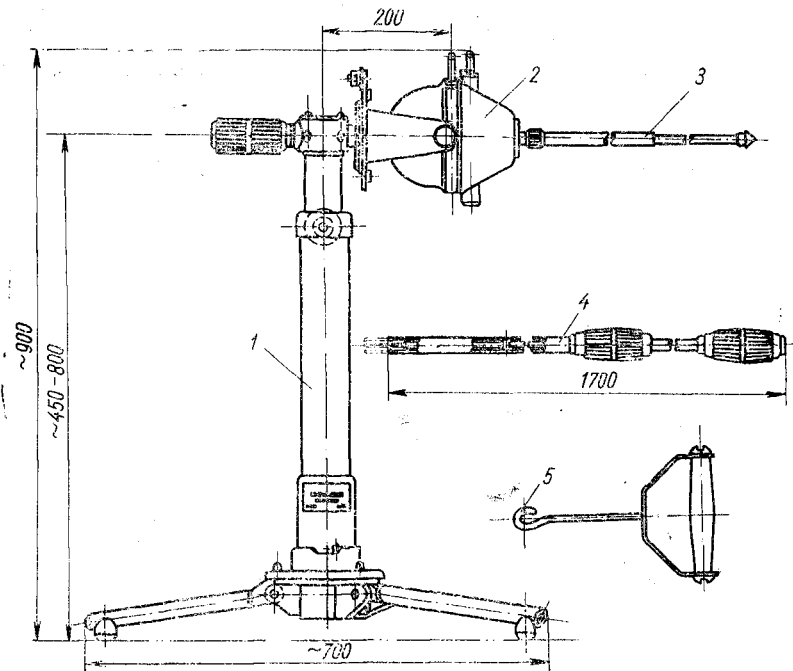


Рис. 18. Общий вид гамма-аппарата ГУП-Тм—0,5-3:

- 1 — штатив; 2 — защитный кожух с затвором и механизмом открывания;
- 3 — центратор; 4 — приспособление для перезарядки; 5 — рукоятка для переноски аппарата.

- 5) тележка;
- 6) рукоятка для переноски аппарата.

Аппарат может работать со штативом или без него.

ГУП-Іг—5-2 — переносной гамма-аппарат (рис. 20), предназначен для просвечивания промышленных изделий в лабораторных, цеховых, стапельных и полевых условиях, а также в труднодоступных местах различных конструкций.

В комплект установки входят:

- 1) защитный контейнер с затвором (рис. 21);

- 2) ручной механизм перемещения источника с гибким валом для дистанционного управления;
- 3) ручки механизм перемещения источника с ручкой для непосредственного управления;

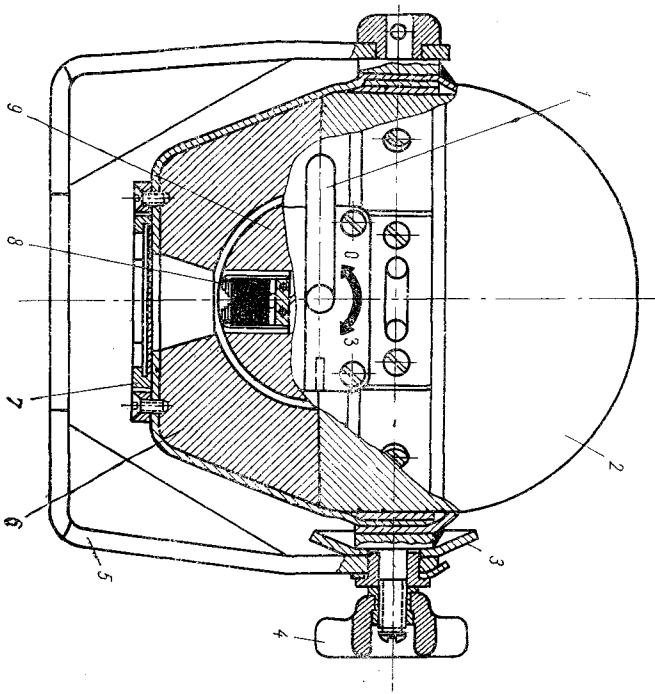


Рис. 19. Схема защитного контейнера ГУП-Тп-0,5-3 с механизмом открывания затвора:
 1 — Г-образная рукоятка для открывания затвора; 2 — внешняя металлическая оболочка контейнера; 3 — диск со шкалой; 4 — ручка для стопорения контейнера; 5 — подставка; 6 — свинцовая защита; 7 — кольцо для крепления центратора; 8 — держатель с источником; 9 — затвор.

- 4) штатив (складной);
 - 5) центратор для определения направления просвечивания;
 - 6) приспособление для перезарядки источника.
- Аппарат работает в двух режимах: просвечивание коническим пучком с углом расхождения 53° и панорамное просвечивание при выведенном источнике. При панорамном просвечивании аппарат управляется только через дистанционный механизм. Аппарат может работать со штативом и без него.

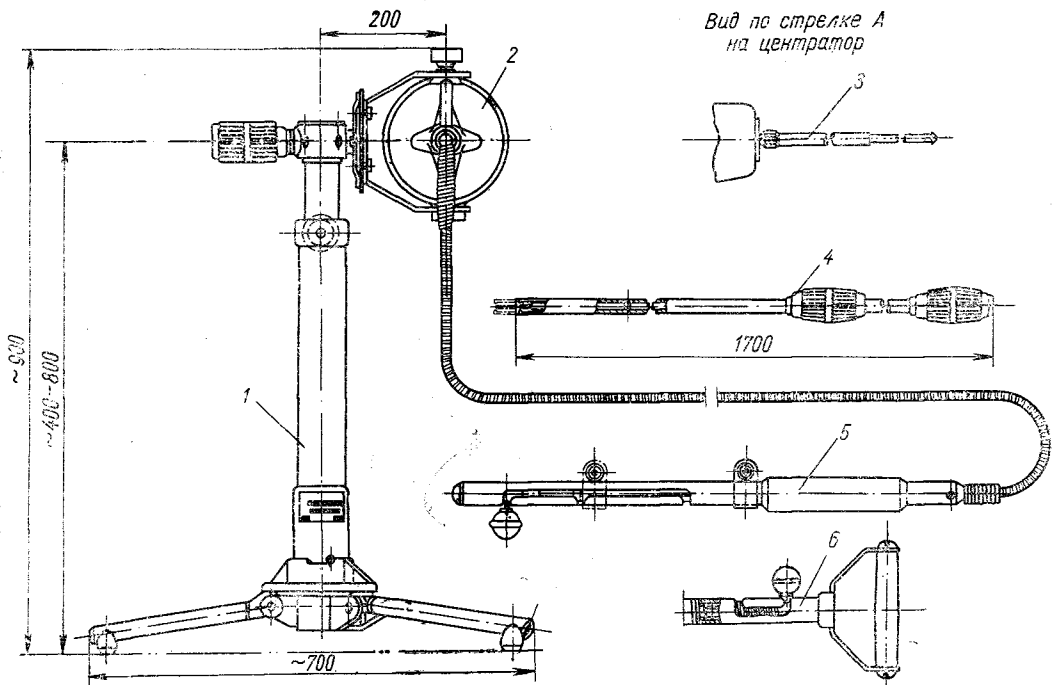


Рис. 20. Общий вид гамма-аппарата ГУП-Гг-5-2:
 1 — штатив; 2 — защитный контейнер; 3 — центратор; 4 — приспособление для перезарядки; 5 — механизм перемещения источника с гибким валом для дистанционного управления; 6 — механизм перемещения источника для непосредственного ручного управления.

Гамма-дефектоскоп РИД-21 — переносной универсальный гамма-дефектоскоп шлангового типа с магазином-контейнером для набора источников, предназначен для работы в лабораториях, цеховых, стапельных, доковых, аэродромных, монтажных условиях, в труднодоступных местах, при ремонтно-восстановительных работах, не требует внешних источников электропитания.

Источник излучения размещен в радиацион-

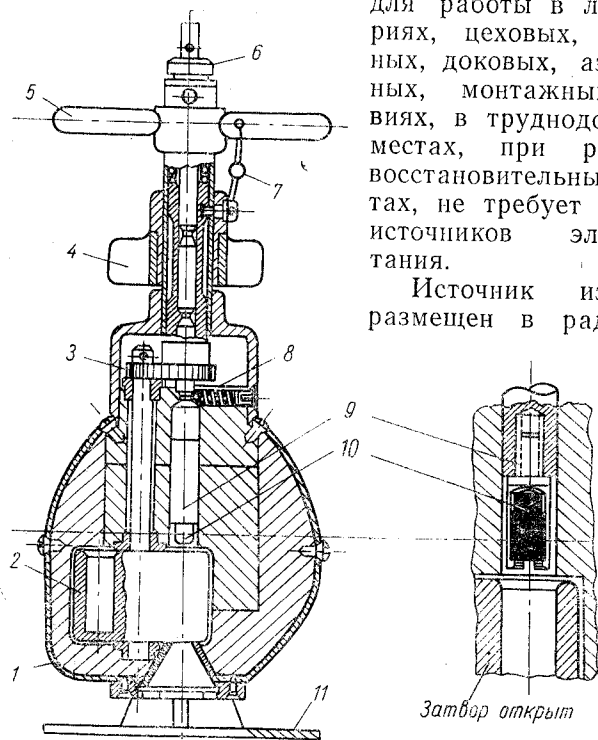


Рис. 21. Схема защитного контейнера ГУП-Гг—5-2 с механизмом открывания затвора:

1 — внешняя свинцовая защита; 2 — затвор; 3 — механизм открывания затвора; 4 — пломба; 5 — ручка для открывания затвора; 6 — ручка для переноса защитного кожуха; 7 — втулка для присоединения механизма перемещения источника; 8 — шариковый фиксатор; 9 — шток; 10 — держатель с источником; 11 — подставка.

ной головке, выполненной из тяжелого сплава. Привод управления транспортером — ручной, тросовый. Расстояние от радиационной головки до пульта управления 10—12 м.

Максимальное перемещение источника от радиационной головки к месту просвечивания: по горизонтали — до 12 м, по вертикали — до 6 м.

Световое сигнальное устройство на пульте управления указывает положение источника в любой момент времени. Перезарядка аппарата новыми источниками производится у потребителя с помощью транспортно-перезарядного контейнера.

Весо-габаритные характеристики аппарата:

	Габариты, мм	Вес, кг
Транспортная тележка	550×700×900	60
Пульт управления	130×400×350	8
Радиационная головка	200×200×270	26
Магазин-контейнер	300×325×365	110

Техническая характеристика вспомогательных принадлежностей для гамма-дефектоскопа РИД-21

Комплект вспомогательных принадлежностей предназначен для использования в гамма-дефектоскопе РИД-21 с целью расширения его технологических возможностей, повышения радиационной безопасности при работе, а также улучшения условий труда операторов.

В состав комплекта принадлежностей входят: универсальный штатив, штатив для крепления на трубах и набор коллимирующих головок.

1. Универсальный штатив обеспечивает возможность его быстрой сборки и переналадки в две компоновки: — штатив-стойку, предназначенную для просвечивания изделий, расположенных на высоте от 200 до 2000 мм;

— штатив-тележку, предназначенную для просвечивания кольцевых стыков труб диаметром от 720 до 1020 мм за одну экспозицию.

2. Штатив для крепления на трубах обеспечивает его надежный монтаж на трубах диаметром от 273 до 1220 мм в любых положениях.

3. Коллимирующая головка для фронтального просвечивания обеспечивает просвечивание направленным пучком с углом конуса 53° в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Головка может крепиться на универсальном штативе и на штативе для крепления на трубах.

4. Коллимирующая головка для панорамного просвечивания предназначена для контроля кольцевых стыков труб за одну экспозицию. Угол расхождения пучка излучения 12° .

Защита коллимирующих головок обеспечивает снижение мощности экспозиционной дозы γ -излучения в 10 раз.

Весь комплект принадлежностей укладывается в два чемодана. Вес рабочего комплекта — 33 кг.

Гамма-дефектоскоп РИД-22 предназначен для фронтального просвечивания в лабораторных, цеховых и монтажных условиях различных отраслей промышленности.

Толщина просвечиваемых материалов: сталь до 80 мм, легкие сплавы до 250 мм.

Источник излучения размещен в радиационной головке из вольфрамового сплава. Мощность дозы на расстоянии 1 м от радиационной головки не более 2,8 мр/ч. Управление выпуском и перекрытием пучка излучения автоматическое автономное, не зависящее от внешних источников энергии. Аппарат можно использовать как переносной, так и передвижной (на тележке с гидравлическим приводом подъема радиационной головки).

Аппарат имеет комбинированную (механическую и электрическую) систему сигнализации. Перезарядка аппарата новым источником излучения производится при помощи транспортно-перезарядного контейнера в условиях эксплуатации.

Основная особенность и отличие от существующих отечественных и зарубежных аппаратов — автономный автоматический привод управлением выпусков и перекрытием пучка излучения, а также конструкция затвора. Существенно улучшена радиационная безопасность работ, расширены технологические возможности контроля, повышено удобство эксплуатации.

Зарядка и перезарядка гамма-дефектоскопа может осуществляться непосредственно у потребителя с помощью перезарядного контейнера. Перезарядный контейнер поставляется в комплекте аппарата по требованию заказчика.

«Бетон» — гамма-дефектоскоп, предназначен для работы в разнообразных условиях строительных и монтажных площадок и в полевых условиях, не требует внешних источников электропитания. Аппарат может быть использован для инспекторского контроля качества строительных работ, в особенности монтажных и сварочных работ, для выявления неоднородностей плотно-

сти материала строительных деталей, расположения стальной арматуры, скрытых коммуникаций фундаментов и т. д. Толщина просвечиваемых материалов: бетона и железобетона — до 30 см, кирпичной кладки — до 40 см, деревянных конструкций — до 50 см, стали — до 6 см, легких металлов и сплавов до 12 см.

Источник излучения помещают в радиационную головку с защитой из вольфрамового сплава, при просвечивании источник перемещается в коллимирующую головку. При транспортировке и хранении источники находятся в магазине-контейнере.

Привод управления транспортером — ручной тросовый, с расстояния до 12 м. Габариты радиационной головки 425×227×320 мм, пульта управления 516×442×160 мм, транспортно-перезарядного контейнера \varnothing 212×280 мм.

Максимальное перемещение источника по вертикали — до 3,5 м. Световое сигнальное устройство на пульте управления указывает положение источника в любой момент времени.

Перезарядка аппарата источниками излучения производится у потребителя с помощью транспортно-перезарядного контейнера.

Рабочий комплект аппарата транспортируется в трех чемоданах, вес комплекта 65 кг. Вес магазина-контейнера 42 кг.

Гамма-дефектоскоп «Трасса» предназначен для контроля качества сварных швов трубопроводов в полевых и монтажных условиях на строительстве газо- и нефтепроводов. Суммарная толщина просвечиваемых стальных стенок до 40 мм, просвечиваемых труб — диаметром от 273 до 1220 мм.

Выпуск и перекрытие пучка лучей осуществляется перемещением затвора. При перемещении части затвора пирамидальной формы проводится просвечивание направленным пучком, при перемещении всего затвора — кольцевым пучком.

Управление затвором может осуществляться: электроприводом с расстояния до 30 м (просвечивание кольцевым пучком изнутри трубы); тросовым механическим приводом с расстояния до 5 м (просвечивание направленным пучком пирамидальной формы через одну или две стенки); съемной рукояткой, присоединяемой

непосредственно к радиационной головке (просвечивание через две стенки).

Замену источника излучения в радиационной головке можно осуществлять непосредственно у потребителя при помощи транспортно-перезарядного контейнера.

Радиационную головку на тележке можно перемещать внутри трубы на расстояние до 30 м. Остановка

Весогабаритные характеристики аппарата

	Габарит, мм	Вес, кг
Радиационная головка	∅ 130×320	18
Тележка ведущая	650×170×200	25
Тележка ведомая	150×135×135	3
Тросовый пульт управления	∅ 65×5000	4
Электрический пульт	400×300×150	8
Контейнер	240×210×230	56
Выпрямитель ВСА-5	560×350×500	53
Батарея 10ЖН-4	752×168×259	20

тележки осуществляется автоматически от сигнала радиометрического датчика. Точность остановки ± 15 мм для труб диаметром 720 мм и ± 30 мм для труб диаметром 1220 мм.

Питание электрической схемы гамма-дефектоскопа может осуществляться либо от сети через выпрямитель ВСА-5, либо от двух батарей 10ЖН-45.

Гамма-дефектоскоп «Лабиринт» является универсальным аппаратом шлангового типа с магазином-контейнером для набора различных источников излучения и предназначен для радиографического контроля стыковых и угловых сварных соединений в особо труднодоступных местах, в цеховых, монтажных и лабораторных условиях.

Толщина просвечиваемой стали — до 60 мм, легких металлов и их сплавов — до 120 мм. Подача источника излучения на заданное расстояние, выдержка времени просвечивания и возврат в положение хранения осуществляется автоматически. Программное устройство обеспечивает подачу источника на расстояния: 2, 4, 6, 8 и 10 м. Скорость перемещения источника по ампулопроводу 0,8 м/сек.

В автоматическом режиме аппарат работает от сети трехфазного тока переменного напряжения 380 в, 50 гц; в ручном режиме питание цепи сигнализации осуществляется от сухих батарей с напряжением 24 в. Диапазоны выдержки реле времени от 1 до 60 мин. Сигнализация положения источника на пульте управления — световая, звуковая и механическая.

Весогабаритные характеристики аппарата

	Габариты, мм	Вес, кг
Транспортная тележка	550×650×872	60
Пульт управления	200×550×340	30
Радиационная головка	150×500×250	28
Магазин-контейнер	275×325×365	107

Расстояние между пультом управления и радиальной головкой до 10 м. Подача источника излучения к месту просвечивания: по горизонтали до 10 м, по вертикали до 6 м.

Геометрия пучков излучения при просвечивании направленным конусным пучком из радиационной головки — 53° , при просвечивании радиационного наконечника — пучок сферический. Перезарядка источников осуществляется при помощи транспортно-перезарядного контейнера.

Гамма-установка «Нева» предназначена для радиографического контроля качества сварных швов изделий типа обечаек диаметром до 10 м с толщиной просвечиваемого материала (сталь) до 70 мм в цеховых условиях любой отрасли промышленности.

Просвечивание производится панорамным пучком. Ширина полей облучения при фокусном расстоянии 5 м — 300 мм и 1800 мм. Привод управления дистанционный, полуавтоматический, по заданной программе.

Ориентация радиационной головки относительно контролируемого шва дублированная: автоматическая — при помощи гамма-бета-реле РТР-1; полуавтоматическая — при помощи сельсинной системы. Сигнализация световая и звуковая. Электропитание от сети переменного напряжения 220 в, 50 гц.

Вес радиационной головки — 120 кг, перезарядного контейнера — 240 кг.

«Газпром» — гамма-дефектоскоп, предназначен для просвечивания в полевых и монтажных условиях кольцевых стыков трубопроводов направленным пучком γ -излучения через две стенки. Суммарная толщина стальных стенок не более 40 мм, диаметр труб от 273 до 1220 мм.

Рабочий комплект аппарата состоит из радиационной головки, пульта дистанционного управления, перезарядного контейнера и штатива.

Защита радиационной головки и перезарядного контейнера выполнена из металлокерамического сплава вольфрама ВМЗ-2. Мощность дозы на расстоянии 1 м от источника, ослабленная защитой, — не более 2,8 мр/ч.

Управление работой затвора радиационной головки дистанционное, пульт управления удален на расстояние 5 м. Кроме того, аппарат имеет встроенный в радиационную головку кулачковый привод, управляемый съемным ключом.

Весо-габаритные характеристики аппарата:

	Габариты, мм	Вес, кг
Радиационная головка	250×170×225	17
Дистанционный пульт управления	4500—5000×60	4,5
Перезарядный контейнер	270×270×250	55

Размеры 100%-ного поля пучка на расстоянии 600 мм от источника 1200×120 мм, что улучшает условия труда оператора.

РК-2 — переносной гамма-аппарат, предназначен для контроля качества литья, сварки, пайки и других технологических процессов, а также для исследования деталей и агрегатов с целью определения их технического состояния. Аппарат можно использовать для контроля труднодоступных участков различных изделий в лабораторных, цеховых, стапельных и полевых условиях. Установка может работать в следующих режимах:

1) просвечивание коническим пучком излучения с углом расхождения 60, 90 и 120°;

2) просвечивание направленным узким пучком размером 13×18 мм;

3) панорамное просвечивание с выходом источника за пределы защитного контейнера.

Просвечивать изделия можно в любом направлении. Для введения источника излучения в труднодоступные участки контролируемого изделия применяют принудительную подачу источника гибким тросом. Установка и контроль величины выдвижения источника в заданные участки контролируемого изделия осуществляется с помощью дистанционного реле. Цикл работы установки автоматический и включает выход источника излучения из контейнера, перемещение его по ампулопроводу на расстояние до 5 м, отсчет времени экспозиции и возврат источника в контейнер.

Штатив установки представляет собой универсальное устройство, выполненное из взаимозаменяемых узлов, что позволяет использовать установку в самых разнообразных компоновках применительно к конкретным требованиям производства. Сборка и разборка установки занимает не более 20 мин. Для хранения и транспортировки установку размещают в транспортных чемоданах.

Управление установкой осуществляется с основного и дистанционного пультов управления, удаленных от установки на расстояние до 10 м. Установка снабжена световой сигнализацией, указывающей местонахождение источника излучения в данный момент, и рассчитана на работу от сети как переменного, так и постоянного тока.

УГД-3 — универсальный гамма-дефектоскоп, предназначен для просвечивания литых, сварных и паяных изделий в лабораторных, цеховых и полевых условиях. Установка работает в двух режимах: просвечивание коническим пучком излучения и панорамное просвечивание. В контейнере-манипуляторе одновременно могут находиться три источника с различной эффективной энергией излучения. Источник излучения (каждый в отдельности) может быть выведен из контейнера на расстояние до 2 м. Манипулирование источником излучения осуществляется автоматически с дистанционного пульта управления. Имеется система аварийного возврата источника в положение «хранение».

Электропитание установки — от сети переменного тока напряжением 220 в или постоянного тока 24 в, имеется автономное питание от аккумулятора и внешняя сигнализация положения источника.

ГУП-Со-0,5-2 — гамма-аппарат, предназначен для просвечивания сварных и литых изделий в стационар-

ных цеховых и лабораторных условиях. Может быть использован при контроле в труднодоступных местах различных конструкций с незащищенным источником излучения. В комплект аппарата входят:

1) источник излучения; 2) защитный контейнер; 3) штатив (передвижной); 4) механизм перемещения источника излучения; 5) две ручки для переноса выемной части защитного контейнера.

ГУП-Со-5-2 и **ГУП-Со-50-2** — гамма-аппараты по назначению и конструктивному оформлению аналогичны аппарату **ГУП-Со-0,5-2**. Усиленная радиационная защита позволяет использовать источники излучения большой активности, вследствие чего данные аппараты имеют более широкий интервал толщины просвечиваемых материалов и изделий.

Обзор зарубежных гамма-аппаратов дан в работе [10].

§ 1. РЕНТГЕНОВСКИЕ ПЛЕНКИ [17]

Рентгеновская пленка применяется для регистрации ионизирующих излучений и состоит из семи слоев. Средний слой-подложка представляет собой тонкую пленку прозрачной и гибкой пластмассы — нитроцеллюлозы или ацетатцеллюлозы. На подложку с обеих сторон наносят тонкие слои специального клея, называемые подслоем, толщиной 0,01—0,03 мм. Подслой улучшает сцепление эмульсионных слоев с гладкой подложкой. На подслое наносится слой фотографической эмульсии, состоящей из суспензии микроскопических кристаллов бромистого серебра в желатине. Толщина эмульсионных слоев достигает 0,03 мм. Для предохранения от механических повреждений эмульсионный слой покрывают тонким защитным слоем желатины толщиной 0,001 мм.

Помимо двусторонних рентгеновских пленок, имеющих два эмульсионных слоя, выпускают пленки с одним эмульсионным слоем. В таких односторонних пленках с одной стороны подложки наносят подслои, эмульсионный слой и защитный слой, а с другой стороны — прозрачный противоскручивающий слой, предотвращающий коробление пленки при обработке.

Экспонирование рентгеновской пленки — воздействие ионизирующих излучений на чувствительный эмульсионный слой рентгеновской пленки, во время которого в результате фотохимической реакции в кристаллах бромистого серебра происходит восстановление отдельных атомов в металлическое серебро, так называемый процесс образования скрытых «центров чувствительности». Число этих «центров чувствительности» пропорционально интенсивности воздействующего на пленку ионизирующего излучения и продолжительности экспозиции. Во время проявления происходит химическая реакция

восстановления, в которой образовавшиеся атомы металлического серебра играют роль катализатора. Поэтому восстановление серебра происходит лишь в тех кристаллах бромистого серебра, в которых образовались скрытые «центры чувствительности». Восстановившиеся атомы металлического серебра придают пленке темную окраску и ее непрозрачность увеличивается.

Непрозрачность рентгеновской пленки — свойство пленки, заключающееся в ослаблении проходящего через нее светового потока. Если на пленку падает световой поток I_0 , то прошедший через нее световой поток I будет меньше падающего вследствие ослабления. Отношение $\frac{I_0}{I}$, показывающее, во сколько раз пленка ослабила проходящий через нее световой поток, называется непрозрачностью пленки. Непрозрачность экспонированной рентгеновской пленки может изменяться в пределах от 1,05 до 10^6 .

Прозрачность рентгеновской пленки — величина, обратная непрозрачности, равна $\frac{I}{I_0}$.

Оптическая плотность рентгеновской пленки D . В радиографии степень потемнения рентгеновского или гамма-снимка принято характеризовать десятичным логарифмом непрозрачности $D = \lg \frac{I_0}{I}$. Эту величину называют оптической плотностью снимка. В интервале величин, которые может принимать непрозрачность снимка, оптическая плотность снимка меняется от 0 до 6.

Оптическую плотность снимков измеряют на специальном приборе — микрофотометре путем сравнения измеряемой оптической плотности с эталонной — оптическим клином. Отечественной промышленностью выпускаются три типа микрофотометров: МФ-1, МФ-2 и МФ-4. Для ориентировочной оценки оптической плотности снимка применяют полоску рентгеновской пленки, имеющую участки с различными известными оптическими плотностями — сенситограмму.

Оптическая плотность снимка зависит от экспозиции, т. е. от интенсивности воздействующего на рентгеновскую пленку ионизирующего излучения и от продолжительности его воздействия, а также от характеристик рентгеновской пленки и от режима фотообработки. В практике радиографии выбирают оптимальные усло-

вия фотообработки и в дальнейшем они остаются постоянными. Экспозицию и характеристики рентгеновской пленки подбирают с учетом конкретных условий контроля таким образом, чтобы оптическая плотность снимков лежала в пределах от 1 до 1,5.

Экспозицию экспонируемой рентгеновской пленки измеряют в единицах дозы облучения — рентгенах. Однако при просвечивании на пленку детали, имеющей участки с различной толщиной, излучение ослабляется на этих участках неодинаково и экспозиция рентгеновской пленки в местах, соответствующих неоднородностям детали, оказывается различной. Это усложняет расчет экспозиции в рентгенах. В практике радиографии экспозицию выбирают в зависимости от контролируемого объекта, и она измеряется произведением анодного тока рентгеновской трубки в миллиамперах на время в минутах (*ма·мин*) в рентгенографии или произведением активности радиоактивного источника в грамм-эквивалентах радия на время в часах (*г-экв Ra·ч*) в гаммаграфии.

Закон взаимозаменяемости устанавливает в экспозиции зависимость между временем и анодным током рентгеновской трубки, характеризующим интенсивность излучения. Согласно этому закону, оптическая плотность пленки D определяется только величиной экспозиции It , где I — анодный ток трубки (или активность радиоактивного источника), t — время просвечивания. Следовательно, для получения двух снимков с одинаковой оптической плотностью D при различном анодном токе I_1 и I_2 необходимо выполнение равенства $I_1 t_1 = I_2 t_2$. Отсюда следует, что увеличение анодного тока I можно компенсировать соответствующим уменьшением времени просвечивания, при этом оптическая плотность снимка не меняется. Закон взаимозаменяемости остается справедливым и в случае применения усиливающих фольг.

При использовании флуоресцирующих экранов экспонирование пленки осуществляется видимым светом, и закон взаимозаменяемости не выполняется. В этом случае для получения одинаковых оптических плотностей при различном анодном токе необходимо выполнение равенства

$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^{0,8}$$

Фотографическая вуаль. Если проявить неэкспонированную рентгеновскую пленку, то ее оптическая плотность окажется неравной нулю, так как во время проявления происходит частичное восстановление в металлическое серебро кристаллов бромистого серебра, не подвергавшихся действию ионизирующего излучения. Кроме того, подложка и эмульсионный слой не являются абсолютно прозрачными. Эта оптическая плотность подложки и эмульсионных слоев, появляющаяся при проявлении неэкспонированной пленки, называется фотографической вуалью.

Возникновение вуали — неизбежное отрицательное явление, однако величина оптической плотности вуали, равная 0,2, практически не влияет на качество снимка и считается допустимой. Оптическая плотность вуали пленок при их изготовлении не превышает 0,15. Существенное влияние на величину вуали оказывает время проявления пленки, а также условия и длительность хранения рентгеновской пленки.

Характеристическая кривая рентгеновской пленки представляет функциональную зависимость оптической плотности снимка от экспозиции. Обычно характеристическую кривую используют не для количественной оценки характеристик пленки, а лишь для сравнения различных рентгеновских пленок или для их качественной оценки. В этом случае употребляется логарифмический масштаб по оси экспозиций, а функциональная зависимость оптической плотности D от экспозиции E имеет вид:

$$D = \gamma_D \lg E + K,$$

где $E = It$; I — интенсивность излучения, воздействующего на пленку; t — время экспозиции; γ_D — наклон прямолинейного участка характеристической кривой при данной оптической плотности; D — контрастность (градиент) пленки; K — постоянная.

На рис. 22 изображены характеристические кривые двух рентгеновских пленок в полулогарифмическом масштабе.

Точка A на кривой 1 (рис. 22) соответствует оптической плотности вуали пленки. На участке AB равным приращениям логарифма относительной экспозиции соответствуют возрастающие приращения оптической плотности. Этот участок кривой называют областью недо-

держек. В точке B приращения оптической плотности достигают максимального значения и на всем протяжении кривой до точки B остаются почти постоянными. Этот прямолинейный участок характеристической кривой BB называют областью нормальных экспозиций. Третья область кривой $BГ$ приближается к максимальному значению оптической плотности. В этой области, называемой областью передержек, равным приращениям логарифма относительной экспозиции соответствуют уменьшающиеся приращения оптической плотности. Наконец на участке кривой за точкой $Г$, называемой областью соляризации, у некоторых типов рентгеновских пленок оптическая плотность практически перестает зависеть от экспозиции: остается постоянной или возрастает незначительно. У некоторых типов пленок с увеличением логарифма экспозиции оптическая плотность в этой области может уменьшаться.

Контрастность (градиент) рентгеновской пленки — это тангенс угла наклона характеристической кривой на линейном участке. Наклон характеристической кривой меняется в зависимости от экспозиции, выраженной в рентгенах (см. рис. 22), и от величины наклона кривой зависит различаемость деталей на снимке. Небольшая разница толщины просвечиваемой детали в радиографии проявляется в виде небольшой разности экспозиций. При одной и той же энергии излучения отношение этих экспозиций будет постоянным и не зависит от абсолютной величины интенсивности излучения и времени экспозиции. Следовательно, $\lg E$ (логарифм отношения экспозиций) тоже будет иметь вполне определенную постоянную величину. Разница оптических плотностей, соответствующая двум экспозициям, будет зависеть от того, в какую область характеристической кривой попали

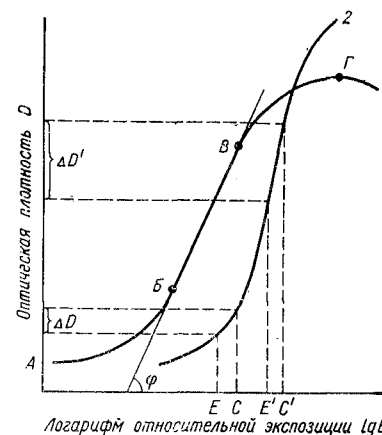


Рис. 22. Характеристические кривые двух рентгеновских пленок.

экспозиции, EC и $E'C'$ — две пары экспозиций (см. рис. 22, кривая 2). Чем круче наклон кривой, тем больше разность оптических плотностей ΔD и $\Delta D'$. На практике контрастность рентгеновской пленки оценивают средним градиентом $\gamma_D = \text{tg } \varphi$, который равен тангенсу угла наклона кривой на ее прямолинейном участке BB' , т. е. в области нормальных экспозиций (см. рис. 22).

Контрастность (градиент) рентгеновской пленки является одной из основных характеристик пленки, однако она может изменяться в зависимости от условий проявления.

Фотографическая чувствительность рентгеновской пленки — способность пленки темнеть при проявлении после облучения ее понижающим излучением. Чем сильнее темнеет экспонированная пленка, тем выше ее фотографическая чувствительность и тем левее сдвигается ее характеристическая кривая. На рис. 22 кривая 1 в области нормальных экспозиций соответствует более чувствительной пленке. Чувствительность рентгеновских пленок измеряется в p^{-1} и определяется двумя точками на характеристической кривой $S_{D=0,85}$ и $S_{\gamma=1,0}$, которые определяются величиной экспозиций, необходимых для достижения определенной оптической плотности и определенной контрастности пленки соответственно. Чувствительность $S_{D=0,85}$ — величина, обратная экспозиции в рентгенах, необходимой для того, чтобы оптическая плотность снимка на 0,85 превышала оптическую плотность вуали. Чувствительность $S_{\gamma=1,0}$ — величина, обратная экспозиции в рентгенах, для которой касательная к характеристической кривой образует угол 45° с осью абсцисс (контрастность равна 1).

Фотографическая чувствительность рентгеновской пленки зависит не только от условий ее изготовления, но и от условий ее фотообработки, в частности от времени проявления, а также от энергии квантов ионизирующего излучения, воздействующего на пленку. Почти все выпускаемые рентгеновские пленки имеют максимальную чувствительность при энергии квантов излучения ~ 80 кэв. При этой энергии определяются характеристики рентгеновских пленок, указанные в их паспорте.

Зернистость рентгеновской пленки. Зернистость пленок обусловлена неравномерным распределением в эмульсии проявленных зерен и групп зерен атомов се-

ребра, из которых складывается рентгеновское изображение. Отдельные зерна имеют размер от 1 до 1,5 $\mu\text{км}$ в диаметре и невооруженным глазом не наблюдаются. Однако в результате наложения их друг на друга можно наблюдать визуально группы зерен. Зернистость изображения на пленке возрастает с увеличением энергии ионизирующих излучений и времени проявления пленки.

Зернистость изображения, обусловленная применением флуоресцирующих экранов, зависит от экспозиции и имеет значительно большую величину, чем зернистость пленки.

Типы рентгеновских пленок. Отечественная промышленность выпускает 5 типов рентгеновской пленки для промышленной радиографии и 6 типов — для медицинской радиографии. Медицинские пленки можно применять и в промышленной радиографии. В табл. 11 приводятся основные характеристики рентгеновских пленок для промышленной радиографии типа РТ и некоторых медицинских пленок типа РМ.

Таблица 11
Основные характеристики рентгеновских пленок

Тип пленки	Время проявления, мин	Фотографические свойства						Физико-химические свойства		
		Рентгеновское излучение						Разрешающая способность, линий/мм	Диаметр зерен броуновского серебра, $\mu\text{км}$	Толщина эмульсии с каждой стороны, $\mu\text{км}$
		с экранами		без экранов						
		$S_{D=0,85}$	γ	$S_{D=0,85}$	$S_{\gamma=1,0}$	γ	D_0			
РМ-1	10	300	3,0	18	30	2,5	0,13	73—78	1,16	17—18
РМ-2	10	400	2,8	20	35	2,8	0,15	73—78	1,16	20—21
РМ-3	10	300	2,7	12	20	2,7	0,13	78	1,16	21—22
РТ-1	10	100	3,5	50—60	80—100	3,5	0,10	68—73	0,77	20—21
РТ-2	10	350	3,0	25	40	3,0	0,15	73—78	1,38	18—19
РТ-3	6—12	35—45	3,0	20—30	35—45	3,9	0,15	111	—	21—22
РТ-4	6—12	—	—	9—12	15—20	3,5	0,10	134	—	21—25
РТ-5	6—12	13	3,5	2—5	6—10	3,5	0,05	178	—	15—16

Пленки типа РТ для промышленной радиографии выпускаются следующих форматов: 130×180 ; 150×400 ; 180×240 ; 240×300 ; 300×400 ; 356×356 мм. По требова-

нию заказчика выпускают рулонную пленку формата $6 \times 23\,000 \div 30\,000$ см.

Область применения рентгеновских пленок. Все выпускаемые пленки можно разбить на четыре класса.

Класс I. Особо мелкозернистая и высококонтрастная безэкранный пленка. Применяется для получения снимков наивысшего качества при просвечивании легких сплавов на основе алюминия и магния рентгеновским излучением, генерируемым при высоких напряжениях на трубке. Применяется как с металлическими экранами (из свинцовой и оловянисто-свинцовой фольги), так и без них. К первому классу относится пленка типа РТ-5.

Класс II. Мелкозернистая высококонтрастная безэкранный пленка. Предназначена для просвечивания легких сплавов рентгеновским излучением, получаемым при низких напряжениях на трубке, и толстостенных стальных деталей при напряжениях 1000 кв и более. По зернистости они уступают пленкам класса I, но вследствие большей чувствительности к излучениям получили более широкое применение. Используются как с металлическими экранами, так и без них. К классу II относится пленка типа РТ-4.

Класс III. Высокочувствительная к излучению безэкранный пленка. Обладает наивысшей чувствительностью к γ - или рентгеновскому излучению, получаемому при высоких напряжениях на трубке. Применяется как с металлическими экранами, так и без них. К классу III относятся пленки типа РТ-1 и РТ-3.

Класс IV. Высокочувствительная к излучению экранная пленка. Обладает наивысшей чувствительностью к излучениям и высокой контрастностью при использовании флуоресцирующих экранов. Применяется при просвечивании изделий из стали, латуни и других тяжелых сплавов на установках с ограниченным напряжением на трубке. При использовании ее без флуоресцирующих экранов или с металлическими экранами эта пленка малоконтрастна, что дает возможность просвечивать за одну экспозицию детали с большим диапазоном толщины с получением сравнительно малого интервала оптических плотностей изображения на снимках. К классу IV относятся пленки типа РТ-2, РМ-1, РМ-2 и РМ-3.

Каждый класс или тип рентгеновской пленки имеет свою область применения в зависимости от плотности и толщины контролируемого материала и от энергии излу-

чения (напряжения на трубке). Области применения рентгеновских пленок различного класса при радиографировании некоторых материалов приводятся на диаграмме, изображенной на рис. 23. При построении диа-

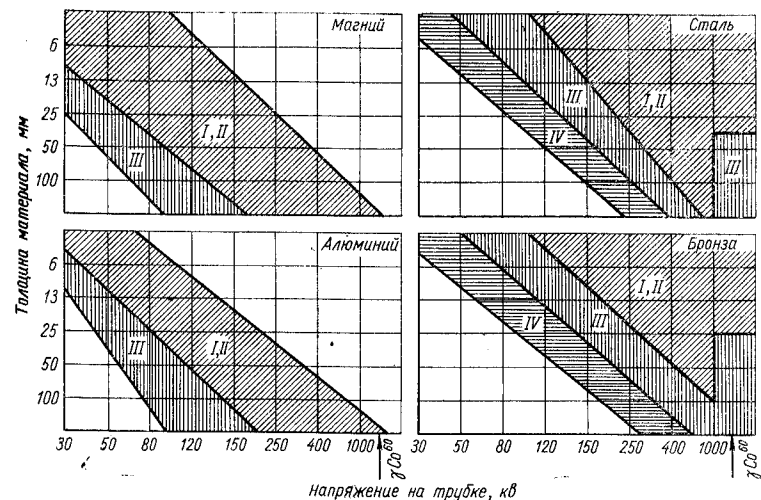


Рис. 23. Диаграммы областей применения рентгеновских пленок в промышленной радиографии. Цифрами I, II, III, IV указывается соответствующий класс рентгеновских пленок.

граммы была сделана попытка сократить время экспозиций, насколько это возможно, однако основное внимание обращалось на то, чтобы при этом достигалось наивысшее качество снимков. В табл. 12 также приводятся области применения в радиографии рентгеновских пленок различного типа. Однако при построении таблицы основное внимание было уделено обеспечению максимальной производительности радиографирования при допустимом качестве снимков. Определенных правил по выбору рентгеновских пленок не существует. В каждом отдельном случае радиографирования выбор пленки определяется конкретными условиями и требованиями, предъявляемыми к контролю. Если при радиографировании какого-либо изделия необходимо обеспечить максимальную скорость просвечивания, рекомендуется выбрать пленку по табл. 12. Если же при

Таблица 12

Область применения рентгеновских пленок в радиографии
в зависимости от энергии излучения, толщины и плотности
просвечиваемого материала

Толщина материала, мм	Напряжение на рентгеновской трубке, кВ							
	Ниже 50	50—80	80—120	120— 150	150— 180	180— 200	200— 400	400—1300

Сплавы на основе железа и близкие к ним по плотности

1—5	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	
5—10	РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5
10—20	—	РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5
20—40	—	РТ-2	РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-1 РТ-3 РТ-4 РТ-5
40—80	—	—	РТ-2	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4 РТ-5
80—100	—	—	—	РТ-2	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-1 РТ-3 РТ-4 РТ-5
Свыше 100	—	—	—	—	—	РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-2 РТ-3 РТ-4

Сплавы на основе титана и близкие к ним по плотности

1—5	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	—	—
5—10	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—
10—20	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5

Продолжение табл. 12

Толщина материала, мм	Напряжение на рентгеновской трубке, кВ							
	Ниже 50	50—80	80—120	120— 150	150— 180	180— 200	200— 400	400—1300
20—40	—	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5
40—80	—	—	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-3 РТ-4 РТ-5
80—100	—	—	—	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-1 РТ-3 РТ-4 РТ-5
Свыше 100	—	—	—	—	РТ-2	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4

Сплавы на основе алюминия и близкие к ним по плотности

1—5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	—	—	—	—	—
5—10	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—	—	—	—
10—20	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	РТ-5	—	—
20—40	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—
40—80	—	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5
80—100	—	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5
Свыше 100	—	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5

Сплавы на основе магния и близкие к ним по плотности

1—5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—	—	—	—
-----	--------------	--------------	--------------	------	---	---	---	---

Толщина материала, мм	Напряжение на рентгеновской трубке, кВ							
	Ниже 50	50—80	80—120	120—150	150—180	180—200	200—400	400—1300
5—10	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—	—	—
10—20	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—	—
20—40	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5	—
40—80	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-3	РТ-1 РТ-3	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-5
80—100	—	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-3	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5
Свыше 100	—	РТ-1 РТ-2	РТ-1 РТ-2 РТ-3	РТ-1 РТ-3 РТ-4	РТ-3 РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5	РТ-4 РТ-5

Примечание. Пленки типа РТ-5 дефицитные и дорого стоят, поэтому целесообразно их применять только в тех случаях, когда это диктуется особыми требованиями, предъявляемыми к контролю.

просвечивании решающим фактором является высокое качество снимка, то пленку выбирают по диаграмме (см. рис. 23). В этом случае вместо рекомендуемого типа пленки целесообразно взять менее чувствительную и, следовательно, более мелкозернистую.

§ 2. ФОТООБРАБОТКА И ХРАНЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ПЛЕНКИ [10, 17]

Фотообработка рентгеновских пленок. После экспонирования пленку подвергают фотообработке. От условий фотообработки зависят такие характеристики рентгеновской пленки, как фотографическая чувствительность, контрастность, оптическая плотность вуали, зернистость. Поэтому устанавливают оптимальные условия фотообработки пленки, и для получения качественного снимка необходимо тщательно соблюдать эти условия. Процесс фотообработки пленки включает сле-

дующие операции: 1) проявление; 2) промежуточную промывку; 3) фиксирование изображения; 4) окончательную промывку; 5) сушку пленки.

Фотообработку пленки производят в фотолаборатории при неактивном освещении или в полной темноте.

Проявление пленки — процесс восстановления экспонированных кристаллов бромистого серебра в металлическое серебро. Неэкспонированные кристаллы бромистого серебра не восстанавливаются. Пленку проявляют в специальном растворе — проявителе. Способ приготовления проявителя и его состав указаны в рецепте завода, изготавливающего пленку.

Приготовление проявителя. Для приготовления проявителя применяют дистиллированную или питьевую воду. В воде растворяют химические реактивы в количестве и порядке, указанном в рецепте. Некоторые химические реактивы медленно растворяются при комнатной температуре (20°С), поэтому для ускорения растворения рекомендуется брать воду, предварительно нагретую до 50°С. При более высокой температуре химические реактивы начинают разлагаться. Для растворения реактивов отмеряют объем воды, равный примерно $\frac{2}{3}$ количества приготавливаемого проявителя. Реактивы растворяют поочередно и каждый последующий добавляют после полного растворения предыдущего. По окончании растворения последнего реактива раствор разбавляют холодной водой при температуре (20°С) до полного количества приготавливаемого проявителя и фильтруют. Приготавливать проявитель лучше всего в стеклянной посуде или в кювете для проявления.

Химические реактивы. Для приготовления проявителя применяются чистые химические реактивы в соответствии с ГОСТ.

Метол, ГОСТ 24—60.

Сульфид натрия кристаллический, ГОСТ 903—41 или сульфид натрия безводный, ГОСТ 195—44.

Гидрохинон, ГОСТ 2549—60.

Натрий углекислый кристаллический (сода), ГОСТ 84—41 или натрий углекислый безводный, ГОСТ 83—63, или поташ сухой, ГОСТ 4221—53.

Калий бромистый, ГОСТ 4160—48.

Вода питьевая, ГОСТ 2874—54, или дистиллированная (20°С).

Химические реактивы в кристаллическом состоянии помимо основного вещества содержат в кристаллах воду. Поэтому если в рецепте указан вес кристаллического реактива, а в наличии имеется безводный, то необходимый для составления проявителя вес безводного реактива вычисляют с учетом процентного содержания химического реактива в кристаллическом состоянии. Кристаллический углекислый натрий содержит 37% углекислого натрия и 63% воды. Кристаллический сульфид натрия содержит 50% сульфида натрия и 50% воды.

Таблица 13

Рецепты проявителей рентгеновской пленки (1—5) и восстанавливающего раствора (6)

Номер проявителя	Метол, г	Параами-дофенол, г	Сульфид натрия кристаллический, г	Гидрохинон, г	Натрий углекислый кристаллический, г	Поташ, г	Калий бромистый, г
1	3,5		120	9,0	108		3,5
2		8,0	50	2,5		40,0	1,0
3	2,0		180	8,0	118		5,0
4	5,0		120	7,5	135		4,5
5	2,2		144	8,8	130		4,0

Восстанавливающий раствор к проявителю № 5

6	4,0		144	16	130		—
---	-----	--	-----	----	-----	--	---

Примечание. В таблице указаны количества веществ, необходимые для приготовления 1 л проявителя.

Рецепты проявителей. В состав большинства проявителей входят одни и те же химические реактивы в различном количестве. В табл. 13 приводятся рецепты нескольких проявителей, применяемых в практике фотообработки рентгеновской пленки. С увеличением содержания в проявителе проявляющих веществ скорость проявления повышается, но при этом возрастает зернистость снимка и снижается чувствительность пленки. Наиболее широко применяют проявитель № 1. Для проявления радиограмм, экспонированных на рентгеновской пленке типа РТ-1, РТ-2 и РМ-1, рекомендуется проявитель № 3.

Качество проявителя зависит от чистоты химических реактивов и от приготовления. От качества проявителя зависят результаты фотообработки рентгеновской пленки.

Качество свежего проявителя можно определить путем сравнения его действия с действием эталонного проявителя, приготовленного из высококачественных химических реактивов в дистиллированной воде. При правильном приготовлении проявителя время проявления в нем отличается от времени проявления в эталонном проявителе не более чем на 15% при одинаковой температуре обоих проявителей. Из-за ошибок при приготовлении проявителя время проявления в нем может отличаться от нормального в 1,5—2 раза и при проявлении пленки в таком проявителе получаются снимки низкого качества.

Свежий проявитель обладает повышенной вуалирующей способностью. Пользоваться им следует не раньше чем через 8—10 ч после его приготовления.

Кюветное и танковое проявление. Проявляют пленку в кювете или в баке—танке, в последнем случае пленку закрепляют на рамках в вертикальном положении. Проявлять в кювете следует небольшое количество пленок, лучше всего по одной. Для равномерного проявления и предотвращения слипания пленок необходимо покачивать кювету и несколько раз перевернуть пленки в процессе проявления. При проявлении в вертикальных баках пленка навешивается на рамки и погружается в бак. Следует 2—3 раза резко поднять рамку на несколько сантиметров и снова ее опустить, чтобы стряхнуть приставшие к пленке пузырьки воздуха. Выбор кюветного или бачкового проявления определяется объемом работ. Кюветное проявление приемлемо при обработке не более десяти снимков в смену.

Восстановление проявителя. Активность проявителя уменьшается по мере проявления в нем пленок, и после проявления в каждом литре проявителя 1,5 м² пленки он приходит в негодность. Если расход проявителя небольшой (2—3 л в сутки), то использованный проявитель выливают. При большом расходе проявителя для поддержания его активности в него добавляют свежие порции проявителя. С этой целью приготавливают проявитель на 30% больше, чем входит в бак для проявления. По мере проявления пленок проявителя в баке становится меньше. После проявления определенного количества пленок в бак доливают оставшийся раствор. После того, как будет израсходован весь запасной раствор, проявитель приходит в негодность.

В процессе проявления в проявителе уменьшается количество проявляющего вещества и увеличивается содержание бромистого калия, что снижает активность проявителя. Поэтому восстановление проявителя более целесообразно осуществить специальным восстанавливающим раствором, в который входит проявляющее вещество, а бромистый калий отсутствует. Рецепт восстанавливающего раствора указан в табл. 13 под № 6. Этот раствор применяют вместе с проявителем № 5.

При добавлении каждого литра восстанавливающего раствора можно проявить дополнительно 1,5 м² пленки. Добавлять восстанавливающий раствор следует небольшими порциями не более 200 мл на каждый литр проявителя. Когда количество добавленного восстанавливающего раствора становится равным первоначальному количеству проявителя, проявитель к дальнейшему восстановлению непригоден.

Хранение проявителя. При длительном хранении активность проявителя уменьшается вследствие окисления проявляющих веществ кислородом воздуха и щелочью. Для уменьшения окисления проявитель следует хранить в доверху наполненных и тщательно закрытых резервуарах, лучше всего из темного стекла. Срок годности проявителя значительно увеличивается (до 1 месяца) при использовании дистиллированной воды. Поэтому при расходе более 5 л проявителя в сутки следует готовить его на дистиллированной воде.

Для увеличения срока хранения проявителя целесообразно готовить его в виде двух растворов. Для приготовления первого раствора в 400 см³ воды растворяют указанные в рецепте количества метола, сульфида натрия и гидрохинона. Затем раствор доливают до 500 см³. Для приготовления второго раствора также в 400 см³ воды растворяют необходимые количества углекислого натрия и бромистого калия и доливают раствор до 500 см³. Такие растворы, приготовленные на дистиллированной воде, сохраняются в течение года, а на простой — в течение трех месяцев, не более. При проявлении смешивают равные количества обоих растворов.

Время проявления рентгеновской пленки указывается заводом-изготовителем вместе с рецептом проявителя. Указанное на пачке с пленкой время проявления верно только при проявлении в свежем стандартном

проявителе (№ 3, табл. 13) при температуре 18° С. На практике выполнить эти условия бывает сложно.

Для поддержания постоянной температуры проявителя требуется сложная аппаратура, а с изменением температуры активность проявителя изменяется. Чем выше температура проявителя, тем больше его активность, и время проявления следует уменьшать. Наоборот, с понижением температуры проявителя время проявления следует увеличивать. Активность проявителя уменьшается по мере проявления в нем пленки, и для получения нормальных снимков время проявления необходимо увеличивать. В табл. 14 даны коэффициенты,

Таблица 14

Коэффициент времени проявления в зависимости от температуры проявителя и количества проявленной пленки

Количество пленки, проявленной в 1 л проявителя, м ²	Температура проявителя, °С				
	16	18	20	22	24
0,0	1,3	1	0,8	0,7	0,6
0,6	1,6	1,2	1,0	0,9	0,8
0,9	1,8	1,4	1,2	1,1	1,0
1,2	2,0	1,6	1,3	1,2	1,1
1,4	Проявитель непригоден				

Примечание. Время проявления в свежем проявителе при температуре 18° С принято за 1.

показывающие, как следует изменить время проявления при изменении температуры проявителя и по мере увеличения количества проявленной пленки.

Определение времени проявления. При большом объеме работ (более 2 м² пленки в смену) корректировать время проявления по количеству проявленных пленок становится неудобно.

В этом случае время проявления определяют по коэффициенту индукции. С этой целью кассету с рентгеновской пленкой размером 10×20 см закрывают наполовину свинцовой полоской по ее длине и экспонируют таким образом, чтобы при нормальном времени проявления оптическая плотность участка пленки, не защищенного свинцом, равнялась 1,0—2,5. Затем пленку разрезают поперек на узкие полоски. Одну из полосок проявляют в свежем проявителе и измеряют по секун-

домеру время до появления первых следов изображения — период индукции. Коэффициент индукции B равен $B = \frac{t_0}{t_1}$, где t_0 — время проявления в свежем проявителе, определяемое в зависимости от температуры по табл. 14, t_1 — замеряемое по секундомеру время до по-

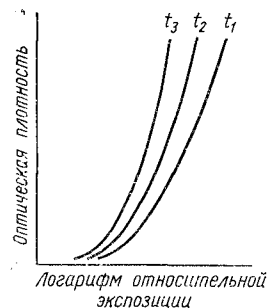


Рис. 24. Влияние времени проявления t рентгеновской пленки на положение ее характеристической кривой $t_3 > t_2 > t_1$.

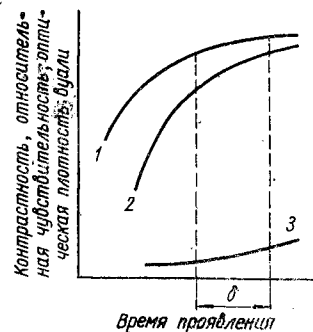


Рис. 25. Зависимость контрастности (среднего градуса) пленки (1), относительной чувствительности пленки (2) и оптической плотности вуали (3) от времени проявления пленки; δ — область нормального времени проявления.

явления первых следов изображения (в свежем проявителе).

Остальные полоски рентгеновской пленки используют для определения времени проявления в истощенном проявителе. Для этого полоску проявляют в частично отработанном проявителе и измеряют по секундомеру время t_2 до появления первых следов изображения. Нормальное время проявления t в таком проявителе будет равно $t = t_2 B$. Эту операцию повторяют каждый раз после проявления определенного количества пленок до тех пор, пока время проявления не увеличится более чем в 1,5 раза при данной температуре и проявитель не придет в негодность.

Влияние времени проявления на характеристики рентгеновской пленки. Существенное влияние оказывает время проявления на характеристики рентгеновской пленки — контрастность, фотографическую чувстви-

тельность, оптическую плотность вуали, зернистость. На рис. 24 показаны характеристические кривые рентгеновской пленки при различном времени проявления. При увеличении времени проявления кривые становятся круче (увеличивается контрастность) и смещаются влево (увеличивается чувствительность).

На рис. 25 приведены кривые изменения контрастности, относительной чувствительности и оптической плотности вуали в зависимости от времени проявления. При ускоренном проявлении применяют проявители, содержащие больше проявляющих веществ. При использовании таких проявителей увеличивается зернистость изображения и снижается чувствительность пленки.

Время проявления определяется нормальными экспозициями. В случае слишком больших или слишком малых экспозиций не рекомендуется корректировать время проявления для достижения необходимой оптической плотности, так как при этом получаются снимки с низкой контрастностью. Различаемость дефектов на таких снимках значительно ниже, чем на снимках, полученных при оптимальных условиях.

Промежуточная промывка. Для остановки проявления и предотвращения попадания проявителя в фиксирующий раствор пленку вынимают из проявителя и промывают в кювете с водой в течение 0,5—2 мин. Для лучшего удаления проявителя из эмульсионных слоев можно применять для промывки 1%-ный раствор уксусной кислоты или 2,5%-ный раствор тиосульфата натрия.

Фиксирование изображения. При фиксировании пленок происходит растворение непроявленных зерен бромистого серебра. При этом восстановленное металлическое серебро не претерпевает изменений. Кроме того, при фиксировании происходит упрочнение эмульсионных слоев пленки. Для фиксирования (закрепления) изображения применяют специальный фиксирующий раствор — фиксаж.

Состав фиксажа. На практике для фиксирования изображения применяют водный раствор тиосульфата натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ (гипосульфита). Это наиболее распространенный фиксаж. Гораздо лучшие результаты получаются при фиксировании пленки в кислых и кислых дубящих фиксажах. В табл. 15 приводятся рецепты фиксирующих растворов, применяемых при фотообработке

Рецепты фиксажей

Номер фиксажа	Гипосульфит, г	Сульфид натрия кристаллический, г	Борная кислота, г	Серная кислота (концентрированная), см ³	Уксусная кислота 30%-ная, см ³	Аммоний хлористый, г	Кальций пиросульфат, г	Натрий метабисульфат, г	Кислоты алюмокалиевые, г
1	250	—	—	—	—	—	—	—	—
2	400	50	40	—	—	—	—	—	—
3	400	50	—	5	—	—	—	—	—
4	400	50	—	—	40	—	—	—	—
5	200	—	—	—	—	50	20	—	—
6	260	—	—	—	—	50	—	16	—
7	250	40	—	—	45	—	—	—	15

Примечание. В таблице указаны количества веществ, необходимые для приготовления 1 л фиксажа.

рентгеновской пленки. Температура фиксажа при фиксировании должна находиться в пределах 18—20°С. Полное время фиксирования пленки в большинстве фиксажей равно удвоенному времени, в течение которого пленка становится прозрачной. В фиксажах № 1—5 время фиксирования колеблется от 10 до 15 мин. Для ускорения процесса фиксирования применяют быстрый фиксаж № 6, в котором время окончательного фиксирования составляет 5 мин. Преимущества кислых фиксажей (№ 2—4) заключаются в том, что они мгновенно останавливают процесс проявления пленки и устраняют желтые пятна, образующиеся на пленке в процессе проявления.

В жаркую погоду, когда температуру фиксажа не удается понизить до 20°С, рекомендуется применять кислый дубящий фиксаж № 7. Такой фиксаж укрепляет (дубит) эмульсионный слой пленки и делает его более устойчивым к повышенной температуре. Время фиксирования в кислом дубящем фиксаже равно примерно 15—20 мин. Ни в коем случае не следует сокращать время фиксирования, так как не полностью растворившиеся соединения серебра в дальнейшем разлагаются и окрашивают пленку в бурый цвет. При этом изображение на пленке пропадает и восстановить его невозможно.

В процессе фиксирования, так же как и при проявлении, необходимо периодически покачивать кювету с раствором.

Промывка пленки. После фиксирования с пленки необходимо удалить оставшиеся химические реактивы. С этой целью пленку промывают в воде (18—20°С) в течение 20—30 мин. Промывать пленку следует в ванне с проточной водой. При отсутствии такой ванны, можно промывать пленку в обычной кювете с водой, однако при этом необходимо раза 3—4 сменить воду.

Сушка пленки. После промывки пленки сушат. При небольшом объеме работ можно сушить пленки, подвешивая их на зажимах к рейкам или проволокам. Сушка происходит быстрее и лучше в струе теплого и сухого воздуха и длится 3—6 ч. При большом количестве обрабатываемых пленок рекомендуется применять специальные сушильные шкафы. Такие шкафы снабжены вентиляторами, фильтрами и подогревателями, и время сушки пленки сокращается до 15—20 мин.

Температура при сушке пленки не должна превышать 28—30°С. Необходимо следить за тем, чтобы на сырую пленку не попала пыль, так как после высыхания пленки пыль с нее удалить невозможно.

Автоматическая фотообработка пленок. Для повышения производительности радиографического контроля в настоящее время в промышленности внедряется автоматическая фотообработка рентгеновской пленки. Автоматическая фотообработка рекомендуется при большом объеме работ (более 5 м² пленки в смену). Серийный выпуск установок для автоматической фотообработки пленок пока не налажен, однако такие установки могут быть изготовлены самой организацией.

Все процессы фотообработки: проявление, остановка проявления, фиксирование, промывка и сушка пленки — в установке полностью автоматизированы. Вручную производится только загрузка и выемка пленки. Применение быстрых проявителей и фиксажей позволяет значительно сократить затраты времени на фотообработку, и вместе с тем качество обрабатываемых снимков повышается. Установки для автоматической фотообработки пленки монтируются таким образом, чтобы загрузочный бункер находился в темной комнате, а разгрузочный — в комнате для расшифровки радиограмм. При этом необходимо учесть, что при использовании автоматических

Дефекты радиограмм, обусловленные неправильной фотообработкой пленок [18]

установок необходимо применять специальные термостойкие пленки.

Сбор серебра. В отработанном фиксирующем растворе, в отходах фотоматериалов и ненужных радиограммах остается большое количество серебра. На предприятиях, где расход фотоматериалов и химических реактивов велик, необходимо организовать сбор серебра.

Для извлечения серебра из отходов фотоматериалов и отработанного фиксажа применяют водный раствор сернистого натрия (Na_2S), причем на 1 г серебра расходуется 1 г сернистого натрия. Для приготовления раствора Na_2S смешивают с водой в пропорции 1 : 5. Полученный раствор смешивают с отходами фотоматериалов (отработанным фиксажем) в пропорции 1 : 3 и нагревают до 70°C . При регулярном перемешивании реакция заканчивается через час с полным выделением серебра.

Горючие фотоматериалы можно сжигать, при этом серебро остается в золе. Извлеченное серебро или золу от сжигания рентгеновской пленки сдают на Московский завод вторичных и драгоценных металлов.

Дефекты снимков. В результате несоблюдения правил и рекомендаций по обращению и фотообработке рентгеновской пленки возникают различные дефекты снимков. Дефекты снимка значительно осложняют расшифровку изображения на снимке и могут привести к неверному заключению о качестве контролируемого изделия. Некоторые дефекты настолько портят снимки, что их расшифровка становится невозможной вообще. Поэтому для предотвращения повторного просвечивания необходимо тщательно соблюдать правила фотообработки пленки и обращения с ней.

В табл. 16 приводятся наиболее часто встречающиеся дефекты снимков, возникающие вследствие неправильной фотообработки пленки, причины их появления и необходимые меры, предотвращающие образование дефектов.

Хранение рентгеновской пленки. При работе с рентгеновской пленкой необходимо соблюдать правила ее хранения. Пленки с нитроцеллюлозной основой являются огнеопасными. Эти пленки не самовоспламеняются, однако легко загораются от любого огня. Тушение пожара затруднено выделением продуктов горения — смеси ядовитых и удушливых газов: угарного газа, синильной

Дефект	Причина появления дефекта	Меры, предотвращающие возникновение дефекта
Вуаль общая или местная	<p>Длительное хранение или несоблюдение правил хранения рентгеновской пленки</p> <p>Сильный свет фотографического фонаря (красный или желто-зеленый). (Может возникнуть в результате старения — обесцвечивания — фильтров).</p> <p>Проникновение света через щели</p> <p>Длительное проявление в теплом проявителе</p> <p>Воздушная вуаль вследствие окисления проявителя</p> <p>Засветка пленки в процессе распаковки, зарядки кассет и в процессе проявления</p>	<p>Не создавать больших запасов пленки, соблюдать правила ее хранения</p> <p>Ослабить освещенность в соответствии с нормой или сменить фильтры фонаря</p> <p>Тщательно закрыть все щели</p> <p>Соблюдать рекомендуемые время проявления и температуру проявителя</p> <p>Без крайней необходимости не вынимать пленку из проявителя до полного окончания проявления</p> <p>Все работы с пленкой производить в полностью затемненной фотокомнате при свете неактивного фонаря</p>
<i>Светлые места</i>		
1. Резко очерченные, расположенные с одной стороны пленки, иногда с цветными краями	Брызги фиксажа на сухую пленку	Тщательно разделять места «сухой» и «мокрой» обработки пленки
2. Круглые пятна с резкими контурами, прозрачные в проходящем свете	Пузырьки воздуха при проявлении	Встряхивать пленку при погружении ее в проявитель. Можно перед проявлением смочить пленку в воде
3. Разной величины пятна с резким контуром	Пыль, порошок или другие загрязнения между пленкой и экраном. Окисленные места на поверхности свинцовых фольг	Следить за чистотой флуоресцирующих экранов и металлических фольг

Дефект	Причина появления дефекта	Меры, предотвращающие возникновение дефекта
4. Пятна в виде дуг, полумесяцев, иногда неправильной формы. Следы надписей	Механическое повреждение эмульсионного слоя пленки (перегиб, сдавливание и пр.) перед просвечиванием	Осторожное обращение с пленками и кассетами, особенно при использовании мягких кассет
5. Штрихи, круглые пятна, точки на разных пленках в одних и тех же местах	Повреждения фольги или чувствительного слоя флуоресцирующего экрана	Заменить неисправные фольги и экраны
6. Пятна округлой формы. Следы пальцев	Непроявленный участок. Прикосновение к эмульсии пальцами, загрязненными жиром или фиксажем	Не допускать слипания пленок при проявлении. Следить за чистотой рук при работе с пленкой
<i>Темные места</i>		
1. Округлые пятна с резким контуром на одной стороне пленки	Брызги проявителя или воды на сухую пленку	Тщательно разделить места «сухой» и «мокрой» обработки пленки
2. Круглые пятна с резким контуром. В середине пятна может быть просветление	Пузырьки воздуха в проявителе или фиксаже	Перемещать пленку в процессе проявления и фиксирования
3. Диффузные пятна различной формы и величины, часто в виде разветвленных фигур	Электрические разряды	Избегать трения сухих пленок
4. Округлые или лучистые пятна с нерезким контуром чаще всего по краям	Попадание света в отверстия и щели кассеты. Плохая упаковка пленок	Применять исправные кассеты. Не выставлять заряженные кассеты на сильный свет. Тщательно упаковывать пленку
5. Пятна сильно затемненные, расположенные по одну сторону пленки	Осадок серебра вследствие соприкосновения эмульсии при обработке с восстанавливающими металлами (железо, медь и др.)	Применять для обработки только специальную посуду — кюветы, бачки
6. Точечные пятна, часто с продолжением	Ржавчина или кусочки металла, попавшие на пленку при проявлении (от рамок, щипцов и др.)	Применять рамки и щипцы из нержавеющей стали и держать их в чистоте
7. Округлые пятна	Неотфиксированный участок	Не допускать слипания пленок или прилипания их к стенкам бачка при фиксировании

Дефект	Причина появления дефекта	Меры, предотвращающие возникновение дефекта
8. Следы пальцев	Прикосновение к эмульсии пальцами, загрязненными проявителем	Следить за чистотой рук при работе с пленкой
9. Потeki (вертикальные полосы против крючков рамок)	Большое скопление эмульсии на крючках рамок от предыдущих пленок	Периодически очищать крючки рамок при бачковом проявлении
10. Потeki по всей поверхности пленок	Пленка не полностью погружена в проявитель. Потeki начинаются от границы воздух — проявитель	Следить за уровнем проявителя в бачках
Дихроическая вуаль (в отраженном свете зеленоватого оттенка, в проходящем — красноватого)	Недостаточная промывка после проявления. Низкая кислотность фиксажа. Попадание проявителя в фиксаж	Увеличить время промывки пленки после проявления, применять подкисленную воду. Применять кислые фиксажи
Желтая вуаль с серым оттенком	Продолжительное проявление, отработанный проявитель	Следить за временем проявления, вовремя менять или восстанавливать проявитель
Желтая вуаль, появляющаяся после хранения снимка	Недостаточное фиксирование	Следить за правильным временем фиксирования

кислоты и др. При хранении огнеопасной рентгеновской пленки требуется соблюдать специальные правила противопожарной безопасности. Пленка с ацетатцеллюлозной основой плохо воспламеняется, горит медленно и не является огнеопасной. При ее хранении необходимо соблюдать обычные правила противопожарной безопасности. На каждой пачке пленки с нитроцеллюлозной основой имеется надпись: «Бережь от огня», а на пачке пленки с ацетатцеллюлозной основой написано: «Безопасная».

Существенное влияние на характеристики рентгеновской пленки, особенно на величину ее оптической плотности в ували, оказывают срок и условия хранения пленки. Вуаль значительно возрастает при хранении пленок в неблагоприятных условиях, а также при слишком длительном хранении даже при строгом соблюдении условий и правил хранения. На коробках с пленкой про-

ставляется дата ее выпуска или дата предельного срока, до которого пленка должна быть проявлена. Гарантийный срок годности пленки равен одному году.

Чрезмерное увеличение вуали рентгеновской пленки иногда может быть вызвано ее облучением ионизирующим излучением во время хранения, а также воздействием паров химических веществ и газов. В табл. 17 приводятся рекомендуемые температура и влажность воздуха и допустимая доза облучения рентгеновской пленки в зависимости от предполагаемого срока хранения.

Таблица 17
Условия хранения рентгеновской пленки

Предполагаемый срок хранения, месяцы	Температура, °С, не выше	Влажность, %	Допустимая доза облучения, <i>мр</i> за неделю
3	25	25—75	0,06
6	22	30—70	0,03
12	20	35—60	0,015

Помещение, в котором хранится пленка, должно хорошо вентилироваться; желательно, чтобы окна выходили на север, особенно при необходимости длительного хранения пленки. Коробки с пленкой нельзя хранить вблизи отопительных приборов. Особенно вредным оказывается колебание температуры и влажности, даже в пределах, указанных в табл. 17. На качество пленки влияют также механические нагрузки на эмульсионные слои, поэтому коробки с пленкой необходимо хранить, складывая их на ребро.

§ 3. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОЛЬГИ И ФЛУОРЕСЦИРУЮЩИЕ ЭКРАНЫ

Фотографическое действие ионизирующих излучений на рентгеновскую пленку может быть вызвано только поглощением их энергии в пленке. Обычно в пленке поглощается менее 1% энергии рентгеновского излучения. Для увеличения фотографического действия ионизирующих излучений в радиографии применяют металлические усиливающие фольги и флуоресцирующие экраны [10].

Металлические усиливающие фольги применяют в радиографии для улучшения качества снимка и для сокращения времени экспозиции при просвечивании.

Улучшение качества снимка при использовании металлических фольг происходит вследствие того, что длинноволновое рассеянное излучение поглощается материалом фольги сильнее, чем первичное. При этом четкость и контрастность снимка повышаются. Фотографическое действие первичного излучения на пленку усиливается фольгой в большей мере, чем действие вторичного излучения.

Усиливающее действие металлических фольг обусловлено эмиссией из металла фотоэлектронов и электронов отдачи, образующихся в результате фотоэлектрического поглощения и комптоновского рассеяния квантов излучения в материале фольги. Электроны вылетают из металла лишь в том случае, если их кинетическая энергия превышает работу выхода из металла (для свинца $\sim 60 \div 80$ кэв), поэтому металлические фольги применяют в радиографии при напряжениях на трубке свыше 100 кв. Электроны, вылетевшие из фольги, попадают в эмульсионные слои пленки и производят в них дополнительное фотографическое действие. Экспонирование пленки в этом случае происходит значительно быстрее, и время экспозиции сокращается.

Материал металлических фольг. Вероятность комптоновского рассеяния квантов излучения пропорциональна атомному номеру поглотителя Z , а вероятность фотоэлектрического поглощения пропорциональна Z^4 . Следовательно, чем больше атомный номер материала фольги, тем больше образуется в ней фотоэлектронов и электронов отдачи и тем сильнее ее усиливающее действие. Обычно в радиографии применяют оловянисто-свинцовые и свинцовые фольги. При низких напряжениях можно применять фольги из более легких металлов, например из меди, алюминия.

Толщина металлических фольг определяется энергией излучения. Оптимальная толщина фольги при данной энергии излучения равна длине свободного пробега электронов в материале фольги. Уменьшение толщины фольги по сравнению с длиной пробега электронов уменьшает коэффициент преобразования энергии излучения в кинетическую энергию электронов, и выход электронов из фольги уменьшается. Увеличение толщи-

ны фольги сверх оптимальной приводит к ослаблению интенсивности первичного излучения и снижению эмиссии электронов из фольги. В обоих случаях усиливающее действие фольги уменьшается. В радиографии при

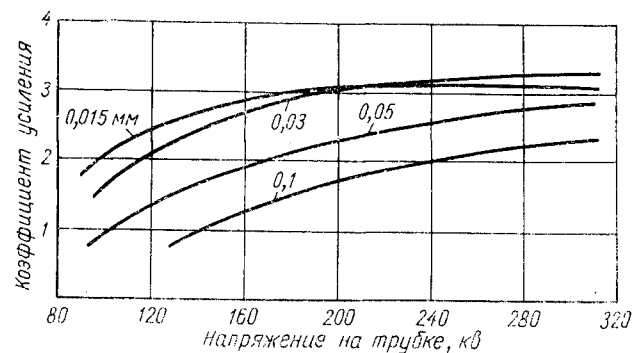


Рис. 26. Зависимость коэффициента усиления оловянных фольг от напряжения на рентгеновской трубке.

меняют металлические фольги толщиной от 0,01 до 0,2 мм. В бетатронной радиографии толщина фольг может достигать нескольких миллиметров.

Коэффициент усиления металлической фольги равен отношению экспозиции радиограммы без фольги к экспозиции радиограммы с применением фольги при одинаковой оптической плотности обеих радиограмм и показывает, во сколько раз необходимо сократить время экспозиции, найденное по номограмме, при просвечивании на пленку с фольгой при тех же анодном токе и фокусном расстоянии. Коэффициент усиления фольг изменяется от 1,5 до 3 и зависит от энергии излучения, материала и толщины фольги. На рис. 26 показана зависимость коэффициента усиления оловянных фольг различной толщины от напряжения на трубке.

Применение металлических фольг. При зарядке кассеты рентгеновскую пленку помещают между двумя фольгами. Для удобства фольгу наклеивают на тонкий лист картона или на использованную рентгеновскую пленку.

Необходимо следить за тем, чтобы на поверхности фольги не было царапин и грязи, иначе не будет обеспечен плотный контакт между фольгой и пленкой. При

этом на снимке образуются размытые пятна, затрудняющие его расшифровку. Первую фольгу по ходу излучения — верхнюю — обычно берут несколько тоньше, чем нижнюю. Увеличение толщины нижней фольги практически не влияет на время экспозиции. Выбор оптимальной толщины верхней фольги зависит от энергии излучения.

В табл. 18 указана рекомендуемая толщина верхних и нижних фольг в зависимости от вида излучения и его энергии. При просвечивании изделий рентгеновским излучением с напряжением на трубке до 250 кВ применяют оловянисто-свинцовые фольги. При напряжениях на трубке свыше 250 кВ и при использовании γ -излучения радиоактивных источников рекомендуется применять свинцовые фольги.

Повышение контрастности снимка при использовании металлических фольг возможно даже при низких напряжениях.

Таблица 18
Толщина металлических фольг, применяемых в радиографии

Вид излучения	Энергия излучения (или источник)	Толщина фольги, мм	
		верхней	нижней
Рентгеновское излучение при напряжении на трубке, кВ	До 150	0,01	0,05
	150—250	0,03	0,1
	250—350	0,05	0,15
	Более 350	0,07	0,2
γ -Излучение радиоактивных источников	^{170}Tm	0,02—0,05	0,05—0,1
	^{75}Se	0,05—0,1	0,2
	^{192}Ir	0,1—0,15	0,2
	^{137}Cs	0,1—0,15	0,2
	^{152}Eu	0,1—0,15	0,2
	^{60}Co	0,1—0,2	0,2—0,5
Тормозное излучение бетатронов, МэВ	15	1,5	2,0
	20	1,7	2,0
	25	2,0	3,0
	30	2,5	3,0

В интервале напряжений на трубке 100—140 кВ можно применять медные фольги, при напряжениях 50—80 кВ — стальные, а при очень низких напряжениях 10—20 кВ — алюминиевые.

Основные характеристики флуоресцирующих экранов

Тип экрана	Люминофор	Нагрузка светосостава, мг/см ²		Коэффициент усиления с пленкой				
		передний экран	задний экран	РТ-1	РТ-2 экранная	РТ-3	РТ-4	РТ-5
Стандарт	CaWO ₄	60	60	1,3	14	3	3,5	2,2
УФДМ	CaWO ₄	40	120	2,0	22	4,7	5,5	3,5
УФД-П/2	CaWO ₄	200	200	2,6	28	6	7	4,4
УФД-П/3	CaWO ₄	200	200	3,9	42	9	10,5	6,6
ПРС	CaWO ₄	40	40	1,4	15	3,3	3,8	2,4
СБ	(BaPb)SO ₄	70	70	2,2	23	5,0	5,9	3,7

Флуоресцирующие экраны. Флуоресцирующий экран представляет собой тонкий лист картона или пластмассы, на который нанесен слой флуоресцирующего вещества — люминофора, чаще всего CaWO₄. Сверху люминофор покрыт защитным слоем лака. Под действием ионизирующего излучения люминофор светится синевато-фиолетовым светом.

Усиливающее действие флуоресцирующих экранов обусловлено воздействием на пленку свечения, возникающего в люминофоре под действием ионизирующего излучения. Поглощенная в слое люминофора энергия излучения преобразуется в видимый свет, который экспонирует прижатую к экрану рентгеновскую пленку. При этом продолжительность экспозиций сокращается в 10—100 раз.

Нагрузка светосостава экрана — количество люминофора на единице поверхности экрана. От величины нагрузки светосостава зависит усиливающее действие флуоресцирующего экрана, т. е. коэффициент усиления.

Коэффициент усиления флуоресцирующего экрана — отношение экспозиции пленки без экрана к экспозиции той же пленки с флуоресцирующим экраном при одинаковой оптической плотности обоих снимков. Максимального значения коэффициент усиления достигает при использовании флуоресцирующих экранов со специальной экранной пленкой, которая сенсibilизирована (очувствлена) к спектру свечения экрана. При замене экранной пленки на безэкранный коэффициент усиления значительно уменьшается.

Зернистость и четкость экранов. Флуоресцирующие экраны дают худшую четкость изображения по сравнению с радиограммами, полученными без экранов или с применением металлических фольг, и применяются только в тех случаях, когда по экономическим причинам без них обойтись нельзя. Четкость изображения, получаемого с применением экрана, уменьшается в результате рассеяния в люминофоре света, излучаемого экраном. Свет от каждого кристалла распространяется во всех направлениях и отражается диффузно от соседних кристаллов, вызывая нечеткость линий на радиограмме. Зернистость экранных изображений превосходит зернистость рентгеновских пленок, так как кристаллы люминофора значительно крупнее зерен эмульсии.

Типы флуоресцирующих экранов. Промышленностью выпускается несколько типов флуоресцирующих экранов для промышленной и медицинской радиологии. Основные характеристики этих экранов приводятся в табл. 19. Максимальный коэффициент усиления имеют флуоресцирующие экраны для промышленной радиологии типа УФД-П/2 и УФД-П/3. Остальные экраны выпускаются для медицинской радиологии, но могут быть использованы и в промышленной радиологии. Наибольшую четкость изображения дают медицинские экраны типа ПРС (повышенной разрешающей способности). Экраны для промышленной радиологии выпускаются следующих форматов: 130×180; 180×240; 240×300; 300×400; 356×356; 150×400 мм. Все экраны выпускаются комплектами, состоящими из двух экранов — переднего и заднего.

Применение флуоресцирующих экранов. Флуоресцирующие экраны используют в радиологии для сокращения времени экспозиции при просвечивании материалов большой толщины. При этом качество снимков ухудшается, понижается контрастность и четкость снимков. Поэтому флуоресцирующие экраны применяют только в тех случаях, когда при просвечивании без экранов необходимые экспозиции оказываются недопустимо большими или когда не требуется высокой чувствительности к дефектам малых размеров. При радиографировании пленку помещают между двумя флуоресцирующими экранами — передним и задним. При зарядке

кассет необходимо следить, чтобы поверхность экранов не имела повреждений и загрязнений и плотно прилегла к пленке. С применением флуоресцирующих экранов становится возможным использовать рентгеновские ап-

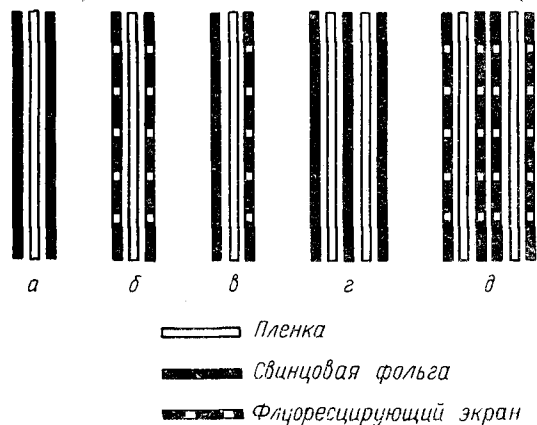


Рис. 27. Способы зарядки кассет:

a — пленка между двумя свинцовыми фольгами;
б — пленка между двумя флуоресцирующими экранами;
в — пленка между свинцовой фольгой и флуоресцирующим экраном; *г* — две пленки в одной кассете с промежуточной фольгой; *д* — две пленки между флуоресцирующими экранами.

параты средней мощности для радиографирования толстенных деталей. Например, при напряжениях на трубке 250 кВ можно контролировать стальное литье толщиной до 75 мм при допустимой продолжительности экспозиций.

Способы зарядки кассет. Различные способы зарядки кассет, применяемые в радиографии, изображены на рис. 27. Светонепроницаемые кассеты в виде двойных конвертов изготавливают из черной неактивной бумаги и в них закладывают рентгеновскую пленку вместе с металлическими усиливающими фольгами, флуоресцирующими экранами или без них. Для получения снимков высокого качества пленку помещают между двумя металлическими фольгами (см. рис. 27, *a*). Для сокращения экспозиций при контроле толстых материалов и изделий пленку закладывают между двумя флуоресци-

рующими экранами (см. рис. 27, *б*). При просвечивании ответственных деталей или в случаях, когда радиографирование по каким-либо причинам затруднено (например, труднодоступное место), рекомендуется вкладывать в кассету по две пленки (см. рис. 27, *г* и *д*). Такой способ зарядки кассет позволяет избежать повторного просвечивания в случае, если эмульсионный слой одного из снимков будет поврежден при фотообработке.

Основы метода радиографии. При радиографировании контролируемый объект просвечивается рентгеновским или γ -излучением (рис. 28). Проникая сквозь

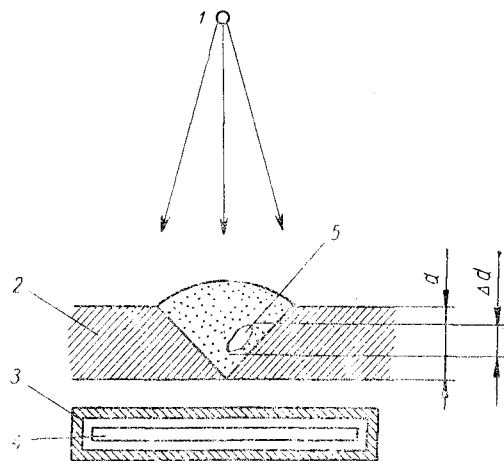


Рис. 28. Схема радиографического метода контроля:

1 — источник излучения; 2 — контролируемый объект; 3 — светонепроницаемая кассета; 4 — рентгеновская пленка; 5 — дефект.

объект, излучение ослабляется в различной степени в дефектных и бездефектных местах. Прошедшее излучение регистрируется пленкой, и после ее обработки на радиограмме получается картина внутреннего строения объекта. От условий радиографирования, от правильного выбора и соблюдения режимов радиографического контроля зависит качество снимка [1, 10, 18—20].

Одним из наиболее важных вопросов в практической радиографии является чувствительность метода, определяющая конкретное применение радиографического метода и его возможности. Условия радиографирования регулируются таким образом, чтобы достигалась оптимальная чувствительность, при этом получаемая чувствительность контролируется в каждой радиограмме. Однако некоторые параметры, влияющие на чувствительность, до настоящего времени изучены не полностью и поэтому не поддаются точному контролю.

Радиографическая чувствительность характеризует выявляемость дефектов методом радиографии. Она определяется минимальным дефектом, выявляемым по радиограмме. Так как реальные дефекты имеют три измерения — одно в направлении просвечивания и два в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания, то в соответствии с этим радиографическая чувствительность характеризуется двумя параметрами: чувствительностью в направлении просвечивания — контрастной чувствительностью и чувствительностью в направлении, перпендикулярном просвечиванию — разрешающей способностью, называемой иногда детальной чувствительностью. Дефект будет выявлен на радиограмме в том случае, если одновременно достигнута необходимая контрастная и детальная чувствительность.

Контрастная чувствительность. Контрастная чувствительность радиографического метода определяет минимальный размер дефекта в направлении просвечивания (глубину дефекта), выявляемого по радиограмме. Абсолютная чувствительность равна размеру минимального дефекта, однако в практике радиографии принято обычно выражать контрастную чувствительность метода относительной величиной. Относительная контрастная чувствительность равна отношению размера минимального дефекта Δd в направлении просвечивания к толщине контролируемого объекта d и выражается уравнением:

$$\frac{\Delta d}{d} = 2,3 \frac{\Delta D}{\mu \Delta \gamma_D},$$

где ΔD — минимальный контраст снимка, воспринимаемый глазом; μ — линейный коэффициент ослабления

излучения в материале объекта; γ_D — контрастность пленки — тангенс угла наклона характеристической кривой пленки в точке, соответствующей оптической плотности снимка D .

Эта формула получена в предположении геометрии узкого пучка и отсутствии ослабления излучения в самом дефекте. Практически радиографирование осуществляется широким пучком излучения, а дефекты в контролируемом изделии могут быть заполнены поглощающими материалами. Поэтому реальная контрастная чувствительность будет значительно ниже.

Если допустить, что реально различимый глазом минимальный контраст снимка $\Delta D \approx 0,02$, а контрастность рентгеновских пленок в области нормальных экспозиций $\gamma_D \approx 3,5$, то относительная контрастная чувствительность приближенно выражается равенством:

$$\frac{\Delta d}{d} = 0,01 \frac{B(\mu, d)}{\mu d},$$

где $B(\mu, d)$ — фактор накопления рассеянного излучения, зависящий от коэффициента ослабления излучения μ и от толщины просвечиваемого объекта d .

Чем меньше величина $\frac{\Delta d}{d}$, тем выше контрастная чувствительность и, следовательно, тем лучше выявляемость дефекта на радиограмме. Контрастная чувствительность зависит от радиографической контрастности контролируемого объекта и от контрастности снимка.

Геометрическая чувствительность (разрешающая способность) радиографического метода определяет способность метода получить раздельное изображение двух близко лежащих точек и характеризуется минимальным размером дефекта в плоскости, перпендикулярной направлению просвечивания (шириной дефекта), выявляемым по радиограмме. Разрешающая способность радиографического метода зависит от разрешающей способности детектора излучения (рентгеновской пленки), но в основном — от геометрических условий радиографирования (от геометрической схемы просвечивания), которые определяют четкость изображения на снимке. Чем выше четкость снимка, тем лучше разрешающая способность достигается при радиографировании и, следовательно, тем лучше выявляются дефекты на радиограмме.

Контрастность радиограмм (снимков) определяется разностью оптических плотностей соседних участков радиограммы, соответствующих дефектным и бездефектным местам контролируемого объекта. Контрастность снимка зависит от радиографической контрастности просвечиваемого объекта и от контрастности применяемых рентгеновских пленок. Минимальный различимый глазом контраст снимка при рассматривании его на негатоскопе принимается равным 0,02.

Четкость снимка, или резкость перехода на снимке от одной оптической плотности к другой, определяется шириной границы между двумя участками снимка с различными оптическими плотностями. Четкость изображения на снимке зависит от геометрической схемы радиографирования и от зернистости изображения.

Радиографическая контрастность контролируемого объекта характеризует изменение интенсивности ионизирующих излучений в процентах, вызванное дефектом размером Δd или соответствующей разностью толщины объекта в различных местах. При этом изменению толщины просвечиваемого объекта на Δd соответствует изменение интенсивности прошедшего излучения I на $\pm \Delta I$, а радиографическая контрастность равна:

$$\pm \frac{\Delta I}{I} = \frac{\mu \Delta d}{B(\mu, d)}.$$

Чем больше радиографическая контрастность контролируемого объекта, тем выше радиографическая чувствительность, достигаемая при его просвечивании. На величину радиографической контрастности влияет ряд параметров.

1. Толщина просвечиваемого материала. С увеличением толщины просвечиваемого материала уменьшается его радиографическая контрастность. Это происходит по следующим причинам. Во-первых, ослабление излучения, обусловленное разностью толщин Δd , становится менее заметным по мере увеличения толщины просвечиваемого материала, так как ослабление излучения происходит сильнее в его верхних слоях, где поглощается длинноволновая часть излучения. При этом первичное излучение, образующее изображение просвечиваемого объекта, становится более однородным и проникающим. Поэтому ослабление излучения слоем материала толщиной Δd больше в верхних слоях просвечиваемого ма-

териала, чем в нижних. Во-вторых, с увеличением толщины просвечиваемого материала возрастает интенсивность рассеянного (вторичного) излучения, увеличивается фактор накопления рассеянного излучения (рис. 29) и радиографическая контрастность просвечиваемого объекта понижается.

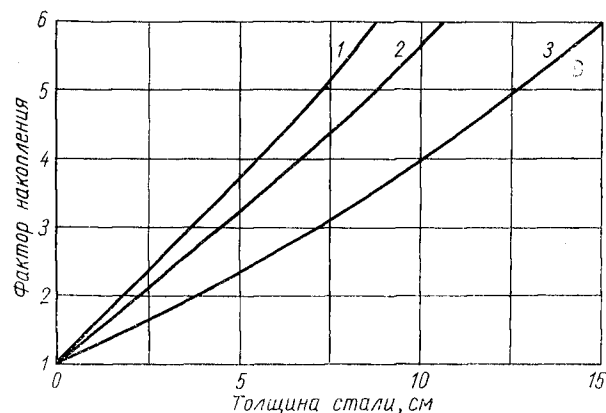


Рис. 29. Фактор накопления рассеянного излучения в зависимости от толщины стали, просвечиваемой излучением радиоактивных изотопов:

1 — ^{192}Ir ,	$\mu = 1,75 \text{ см}^{-1}$;
2 — ^{137}Cs ,	$\mu = 1,45 \text{ см}^{-1}$;
3 — ^{60}Co ,	$\mu = 1,05 \text{ см}^{-1}$.

2. Материал контролируемого объекта. Ослабление излучения в слое материала контролируемого объекта толщиной Δd пропорционально $\mu \Delta d$. Коэффициент линейного ослабления излучения μ определяется атомным номером и плотностью просвечиваемого материала. Чем больше атомный номер материала и его плотность, тем сильнее ослабляется в нем излучение. Поэтому радиографическая контрастность при просвечивании тяжелых материалов больше, чем при просвечивании легких.

3. Энергия излучения. Линейный коэффициент ослабления излучения зависит от энергии квантов. В области малых энергий квантов излучения (больших длин волн) коэффициент ослабления излучения достигает больших значений, поэтому длинноволновое излучение обладает низкой проникающей способностью и значительно ослабляется даже тонким слоем просвечиваемого материала.

Вследствие этого радиографическая контрастность повышается с уменьшением энергии применяемого излучения. Наилучшая радиографическая контрастность достигается при использовании для просвечивания излучений с энергией ниже 60—80 кэв. Однако в практике радиографирования энергию излучения выбирают с учетом плотности и толщины просвечиваемого материала таким образом, чтобы экспозиции просвечивания не превышали допустимой величины. Ослабление немонотонного излучения характеризуется эффективным коэффициентом ослабления. По мере прохождения излучения через просвечиваемый материал происходит фильтрация его длинноволновой части и излучение становится более однородным и проникающим. Поэтому эффективный коэффициент ослабления излучения уменьшается с увеличением толщины просвечиваемого материала.

4. Рассеянное излучение. В процессе радиографирования кванты ионизирующего излучения рассеиваются электронами, находящимися в атомах контролируемого объекта. При рассеянии длины волн излучения увеличиваются, поэтому проникающая способность рассеянного излучения меньше, чем у первичного. Тем не менее, воздействуя на пленку, рассеянное излучение вуалирует изображение просвечиваемого объекта, вследствие чего радиографическая контрастность понижается. Рассеянное излучение возникает не только в контролируемом объекте, но и в любых окружающих предметах: кассетах, столах, стенах и т. д.

Рассеянное излучение полностью устранить нельзя, однако в практике радиографирования принимается ряд специальных мер для ослабления его воздействия на пленку:

- 1) экраны из свинцовой фольги;
- 2) защита из свинца от обратно рассеянного излучения;
- 3) маски и диафрагмы, ограничивающие пучок излучения;
- 4) фильтры.

Низкой радиографической контрастностью обладают материалы, имеющие большой коэффициент рассеяния излучения.

5. Экспозиции. Величина экспозиций при радиографировании выбирается с учетом плотности, толщины кон-

тролируемого материала и применяемых пленок таким образом, чтобы оптическая плотность снимка находилась на прямолинейном участке характеристической кривой и лежала в пределах 1—1,5. При этом достигается максимальная возможная радиографическая контрастность объекта и снимка. В случае недодержек или передержек (малые или большие экспозиции) контрастность снимка уменьшается, ухудшается контрастная чувствительность и выявляемость дефектов снижается.

Контрастность снимка. Контрастность снимка определяется минимальной разностью экспозиций, обусловленной радиографической контрастностью просвечиваемого материала, которую можно зарегистрировать на рентгеновскую пленку. При высокой контрастности снимка лучше просматриваются отдельные детали изображения и, следовательно, лучше выявляются дефекты. Однако чрезмерное увеличение контрастности снимка вызывает уменьшение видимости деталей в участках с большими и малыми оптическими плотностями, и выявляемость дефектов в этом случае будет хуже. Помимо радиографической контрастности контролируемого объекта на контрастность снимка оказывают влияние некоторые другие факторы.

1. Контрастность рентгеновской пленки. При радиографировании материалов и изделий контрастности рентгеновской пленки выбирают в зависимости от радиографической контрастности контролируемого объекта, применяемого излучения, фольг и экранов. При просвечивании материала, имеющего приблизительно одинаковую толщину по всему просвечиваемому участку (т. е. низкую радиографическую контрастность), интервал интенсивностей прошедшего излучения будет мал. В этом случае применяют высококонтрастные рентгеновские пленки, позволяющие получать снимки с удовлетворительной контрастностью и обладающие наивысшей радиографической чувствительностью. Если же радиографическая контрастность контролируемого изделия велика, то интервал интенсивностей прошедшего излучения будет широк, и просвечивание производится на мало контрастную пленку. В этом случае, чтобы выявить детали на всех участках радиограммы, целесообразно применять специальные приемы, понижающие радиографическую контрастность объекта (например, применение компенсаторов, увеличение энергии излуче-

ния) даже за счет некоторого ухудшения радиографической чувствительности.

2. Оптическая плотность. От величины оптической плотности радиограммы зависит различимость деталей изображения на ней. Экспериментально установлено, что оптимальная различимость деталей изображения на снимке достигается при оптической плотности снимка, лежащей в пределах от 1 до 1,5.

3. Условия проявления. От условий проявления зависит контрастность и чувствительность рентгеновской пленки. Поэтому рецепт проявителя и время проявления влияют на контрастность снимка.

4. Способ зарядки кассеты. Контрастность рентгеновских пленок может сильно изменяться от применения их с флуоресцирующими экранами. Вследствие этого контрастность снимка зависит от способа зарядки кассеты.

Четкость снимка. Четкость снимка или резкость изображения просвечиваемого объекта определяется шириной граничной полосы, разделяющей два участка снимка с различными оптическими плотностями. Эта переходная полоса на радиограмме называется радиографической нерезкостью и может быть обусловлена различными причинами. Наиболее часто в радиографии приходится иметь дело с четырьмя видами радиографической нерезкости.

1. Нерезкость перемещения $U_{\text{п}}$ обусловлена независимым перемещением контролируемого предмета, пленки или источника излучения во время просвечивания. В практике радиографирования такие случаи редки и легко устранимы.

2. Экранная нерезкость $U_{\text{э}}$ возникает вследствие рассеяния света в кристаллах флуоресцирующего вещества. Этот вид нерезкости встречается редко, так как в практике радиографирования флуоресцирующие экраны не применяются без особой необходимости при напряжениях на трубке свыше 100 кв. Экранная нерезкость возрастает при плохом контакте экрана с пленкой. Применяемые усиливающие экраны из свинцовой фольги имеют нерезкость, во много раз меньшую, чем нерезкость флуоресцирующих экранов.

3. Внутренняя (собственная) нерезкость рентгеновских пленок $U_{\text{в}}$. Внутренняя нерезкость пленок обусловлена рассеянием вторичных электронов в эмульсионном слое пленки. При взаимодействии ионизирующих

излучений с бромистым серебром эмульсии, основанием пленки или свинцовой фольгой образуются фотоэлектроны и электроны отдачи. Эти электроны попадают в эмульсионный слой пленки и вызывают в нем фотохимические реакции. В результате этого граница изображения становится нерезкой. Чем больше энергия ионизирующих

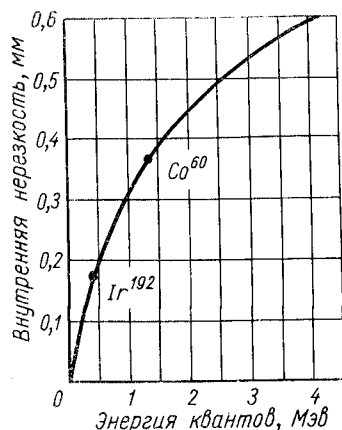
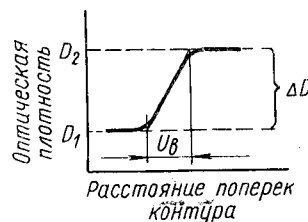


Рис. 30. Зависимость внутренней нерезкости пленок от энергии излучения.

излучений, тем большую кинетическую энергию приобретают вторичные электроны и тем больший путь они могут пройти в пленке. Поэтому внутренняя нерезкость увеличивается при увеличении энергии излучения. На рис. 30 приводится зависимость внутренней нерезкости рентгеновских пленок от энергии излучения.

4. Геометрическая нерезкость U_r . Геометрическая нерезкость возникает вследствие протяженности источника излучения и зависит от геометрических условий просвечивания. Так как образование рентгеновского изображения происходит аналогично образованию оптического изображения (по геометрическим законам), то при просвечивании предмета излучением от протяженного источника около изображения предмета появляется область полутени, вследствие чего изображение кажется нерезким. На рис. 31 показана схема образования геометрической нерезкости. Излучение от протяженного источника падает на предмет AB , и прошедшее излучение попадает на пленку. Изображение просвечиваемого предмета образуется полной тенью $A'B''$ и полутенью $A''A'$ и $B''B'$. В области полутени оптическая плотность



плавно изменяется от оптической плотности изображения до оптической плотности окружающего фона. Геометрическая нерезкость изображения U_r равна ширине переходной области полутени $A''A'$ и вычисляется по формуле:

$$U_r = \frac{\Phi b}{a},$$

где Φ — размер источника излучения; a — расстояние источник — предмет; b — расстояние предмет — пленка.

Общая нерезкость U . Общая нерезкость изображения на снимке определяется всеми видами нерезкости и вычисляется по формуле

$$U^2 = U_{\pi}^2 + U_s^2 + U_b^2 + U_r^2.$$

В практике радиографирования наиболее часто приходится иметь дело с геометрической нерезкостью и внутренней нерезкостью пленок.

Геометрические условия радиографирования. Геометрические условия радиографирования определяются рядом величин: фокусным пятном Φ (проекция источника излучения на плоскость просвечивания), фокусным расстоянием F (расстояние от источника излучения до пленки), расстоянием от предмета до пленки b и размером поля облучения (величина просвечиваемого участка контролируемого изделия). От геометрических условий радиографирования зависит геометрическая нерезкость изображения и, следовательно, разрешающая способность метода.

В практике радиографирования геометрические условия выбирают таким образом, чтобы чувствительность метода и его разрешающая способность были оптимальными.

1. **Фокусное пятно.** От размера фокусного пятна пропорционально зависит величина геометрической нерез-

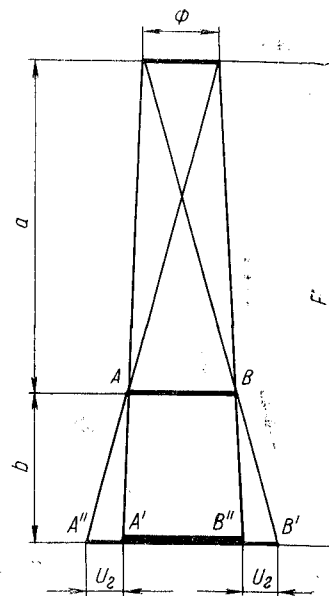


Рис. 31. Схема образования геометрической нерезкости.

кости изображения просвечиваемого предмета. Поэтому при радиографировании для уменьшения геометрической нерезкости изображения необходимо применять источники излучения с возможно меньшими линейными размерами (фокусным пятном). Однако уменьшение фокусного пятна приводит к уменьшению интенсивности излучения источника, вследствие чего увеличиваются необходимые экспозиции просвечивания. Диаметры активной части радиоактивных источников излучения в зависимости от их активности лежат в пределах от 2 до 15 мм. Размеры фокусного пятна обычных рентгеновских трубок того же порядка. Для получения наивысшей резкости изображения применяют острофокусные рентгеновские трубки с размером фокусного пятна $\sim 0,4$ мм.

2. *Фокусное расстояние F.* Если при просвечивании нельзя применить источник излучения с малым фокусным пятном, то геометрическую нерезкость можно уменьшить за счет увеличения фокусного расстояния. Однако при увеличении фокусного расстояния резко уменьшается интенсивность излучения (по закону квадрата расстояния) в месте расположения пленки и время экспозиций увеличивается. В практике радиографирования оптимальное фокусное расстояние для заданных фокусного пятна Φ и толщины просвечиваемого материала d определяется из равенства

$$F = \frac{2d\Phi}{U_B},$$

где U_B — внутренняя нерезкость рентгеновских пленок при максимальной энергии излучения применяемого источника (см. рис. 30).

В этом случае геометрическая нерезкость равна половине внутренней нерезкости пленок при выбранной энергии излучения, а общая нерезкость на 10% превышает минимальную нерезкость. Если есть возможность увеличивать время экспозиции, то фокусное расстояние берется больше, чем определяемое из уравнения.

3. *Поле облучения.* Если просвечиваемый участок контролируемого объекта по размерам сравним с фокусным расстоянием, то оптическая плотность на краях радиограммы будет значительно меньше, чем в центре. На рис. 32 изображена схема просвечивания предмета в центральном (перпендикулярном предмету) направлении и в наклонном. Уменьшение оптической плотности

к краям снимка происходит по двум причинам: во-первых, фокусное расстояние в наклонном направлении больше, чем в центральном, $F_2 = \frac{F_1}{\cos \alpha}$ и, следовательно интенсивность излучения будет больше в центре пленки,

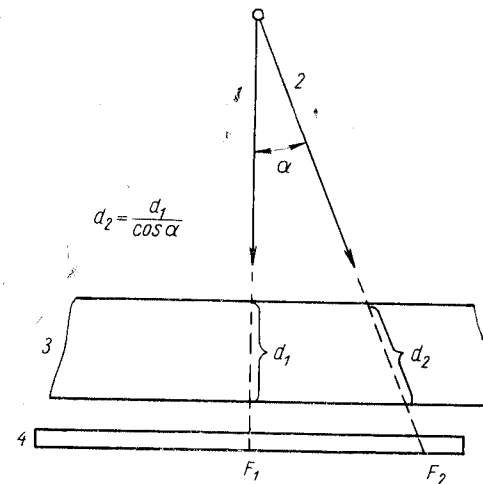


Рис. 32. Просвечивание в центральном (1) и наклонном (2) направлениях; 3 — просвечиваемый объект; 4 — пленка.

чем на краю, так как она обратно пропорциональна квадрату фокусного расстояния. Во-вторых, в наклонном направлении больше просвечиваемая толщина, $d_2 = \frac{d_1}{\cos \alpha}$, значит, и сильнее ослабление излучения.

Вследствие этого оптическая плотность на краю радиограммы меньше, чем в центре, и радиографическая чувствительность соответственно хуже.

В практике радиографирования размер поля облучения выбирают так, чтобы угол между центральным и наклонным направлением просвечивания (α) не превышал 20—22°. При этом фокусное расстояние и просвечиваемая толщина не более чем на 10% превышают соответствующие величины в центральном направлении.

4. *Положение дефекта и его ориентация.* Место положения дефекта в просвечиваемом материале влияет на резкость его изображения. Чем ближе расположен

дефект к пленке, тем меньше геометрическая нерезкость его изображения, тем лучше условия для выявления дефекта. В практике радиографирования для уменьшения геометрической нерезкости стремятся расположить

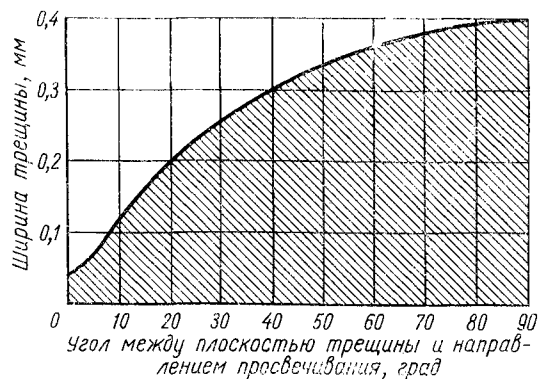


Рис. 33. Зависимость выявляемости трещины глубиной 6 мм от ширины раскрытия и угла между плоскостью трещины и направлением просвечивания. В заштрихованной области трещина не видна.

пленку возможно ближе к просвечиваемому предмету. Обычно контролируемая деталь кладется непосредственно на кассету с пленкой. Центральный луч пучка излучения должен быть по возможности перпендикулярен к пленке, чтобы искажение пространственных соотношений просвечиваемого объекта было минимальным. Сечение предмета, представляющее наибольший интерес, должно быть по возможности параллельно пленке.

В некоторых случаях выявляемость дефекта может сильно зависеть от его ориентации относительно направления излучения.

Дефекты с прямолинейными гранями, направленными параллельно излучению, выявляются значительно лучше вследствие большой резкости изображения их границ. Дефекты цилиндрической, шаровой или другой формы выявляются значительно хуже. При шаровой форме дефекта оптическая плотность его изображения изменяется постепенно от максимальной, определяемой его диаметром, до плотности потемнения всего снимка, а потому изображение не будет резким. Наилучшая вы-

являемость дефекта будет в том случае, если излучение проходит вдоль него. Примером такой зависимости может служить выявляемость трещин (рис. 33). Лучше всего трещины выявляются в том случае, когда направление просвечивания совпадает с плоскостью трещин. С уменьшением ширины раскрытия трещин и с увеличением угла между плоскостью трещины и направлением просвечивания их выявляемость ухудшается.

5. Геометрическое увеличение. При использовании источников излучения с очень малым размером фокусного пятна (например, острофокусные рентгеновские трубки или бетатроны) можно получить увеличенное изображение без появления нежелательной геометрической нерезкости. В этом случае пленку помещают на некотором расстоянии от просвечиваемого предмета (рис. 34), а увеличение изображения равно

$$A'B' = \frac{F}{a} AB = \frac{a+b}{a} AB,$$

где AB — размер просвечиваемого предмета; $A'B'$ — увеличенное изображение предмета; a — расстояние от источника излучения до предмета; b — расстояние от предмета до пленки; F — фокусное расстояние.

Таким образом можно получить увеличение до трех раз с выявлением подробностей, невидимых при обычной радиографии. Геометрическое увеличение можно также использовать для борьбы с рассеянным излучением, так как при увеличении расстояния от предмета до пленки доля рассеянного излучения по отношению к прямому пучку уменьшается.

Зернистость изображения. Помимо геометрической и внутренней нерезкости нерезкость контуров изображения может быть обусловлена зернистостью изображе-

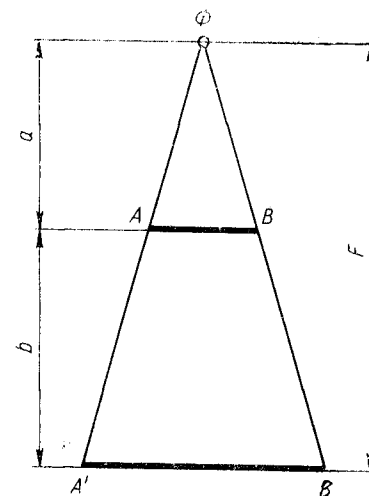


Рис. 34. Геометрическое увеличение просвечиваемого предмета.

ния. При рассматривании изображения на пленке отдельные проявленные зерна бромистого серебра налагаются друг на друга и образуют группы, заметные невооруженным глазом, вследствие чего контуры изображения выглядят нерезкими. Величина зернистости изображения зависит от нескольких причин.

1. *Зернистость пленки.* Каждый тип рентгеновской пленки характеризуется определенной величиной зерен бромистого серебра. Для получения снимков высокого качества желательно применять мелкозернистые пленки. С другой стороны, чем крупнее зерна бромистого серебра, тем выше чувствительность пленки. Поэтому в практике радиографии выбор типа пленки определяется ее чувствительностью в зависимости от допустимых экспозиций.

2. *Условия проявления.* Так как проявитель собирает зерна в довольно большие массы, заметные невооруженным глазом, то подробности изображения будут зависеть от величины этих масс. Эффективная зернистость определяется, таким образом, составом проявителя и временем проявления. Увеличение скорости и времени проявления увеличивает зернистость изображения.

3. *Экранная зернистость.* Флуоресцирующий слой экрана состоит из отдельных кристаллов, поэтому изображение на экране имеет зернистую структуру. Однако нерезкость изображения, создаваемая экранами, всегда оказывает более существенное влияние на качество снимка, чем их зернистость.

Эталоны чувствительности. В практике радиографирования условия проведения и режимы контроля выбирают таким образом, чтобы достигалась оптимальная радиографическая чувствительность. Достигаемая радиографическая чувствительность контролируется в каждой радиограмме путем наложения на контролируемый предмет стандартной детали — эталона чувствительности. Эталон чувствительности представляет собой пластинку с искусственно воспроизведенными в ней дефектами различного размера и изготавливается из того же материала, что и контролируемое изделие. Существует много типов эталонов чувствительности: эталоны с канавками, проволочные, ступенчатые, эталоны с отверстиями и другие. В практике радиографирования обычно применяют стандартные эталоны с канавками.

1. *Эталоны с канавками (ГОСТ 7512—55)*¹. Набор эталонов состоит из четырех пластинок, в которых проточены канавки различной глубины. Параметры эталонов с канавками приведены в табл. 20. Эталоны имеют номера в порядке возрастания их толщины, причем толщину эталона выбирают в соответствии с контролируемой чувствительностью. Первый номер эталона применяют для контроля наивысшей радиографической чувствительности. Эталоны с канавками хорошо имитируют дефекты сварки — трещины, непровары. Недостатком этих эталонов является невозможность контролировать разрешающую способность метода.

Т а б л и ц а 20
Параметры эталонов с канавками (ГОСТ 7512—55)

Марка	Диаметр отверстий, мм	Размеры, мм	Ширина канавки, мм	Расстояние между канавками, мм	Глубина канавок Δd, мм
1	1,5	26×10×2	1,5	3	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5
2	2,0	52×15×4	2,0	4	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,8
3	2,0	47×15×5	2,0	5	0,5; 1,0; 2,0; 2,5; 3,0
4	2,5	50×15×8	2,5	5	1; 2; 3; 4; 5; 6

2. *Проволочные эталоны.* Иногда применяют проволочные эталоны чувствительности, представляющие отрезки проволоки различного диаметра, закрепленные в пластмассовой пластинке. Проволоку изготавливают из того же материала, что и контролируемое изделие, или из близкого к нему по плотности. Проволочные эталоны лучше имитируют такие дефекты, как поры, раковины и шлаковые включения и позволяют контролировать как контрастную чувствительность метода, так и его разрешающую способность. Параметры проволочных эталонов приведены в табл. 21.

Измерение радиографической чувствительности. Достигаемую радиографическую чувствительность оценивают по наименьшему элементу эталона чувствительно-

¹ Взамен действующего ГОСТ 7512—55 в ближайшее время будет выпущен новый.

сти, выявляемому по радиограмме. В случае применения эталонов с канавками экспериментальная чувствительность S в процентах вычисляется по формуле:

$$S = \frac{\Delta h}{d + h} \cdot 100\%,$$

где Δh — наименьшая глубина канавки эталона, выявленная на радиограмме, мм; d — толщина контролируемого изделия в месте установки эталона, мм; h — полная толщина эталона чувствительности, мм.

Таблица 21
Параметры проволочных эталонов

Контролируемый материал	Марка	Обозначение свинцовыми дробинками	Цвет марки	Диаметр проволоки, мм
Сплавы на основе меди	1	.	Красный	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60
	2	..	«	0,50; 0,60; 0,80; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60
	3	...	«	1,50; 2,00; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50
Сплавы на основе железа	1	..	Синий	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60
	2	..	«	0,50; 0,60; 0,80; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60
	3	..	«	1,50; 2,00; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50
Сплавы на основе алюминия	1	...	Серый	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60
	2	...	«	0,50; 0,60; 0,80; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60
	3	...	«	1,50; 2,00; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50
Сплавы на основе магния	1	Зеленый	0,15; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60
	2	«	0,50; 0,60; 0,80; 1,00; 1,20; 1,40; 1,60
	3	«	1,50; 2,00; 2,50; 3,00; 3,50; 4,00; 4,50

Измеряемая по эталону чувствительность не дает представления о размерах реальных дефектов, выявляемых на радиограмме, и служит средством оценки качества радиографического изображения, т. е. контролирует заданный режим просвечивания, при котором достигает-

ся оптимальная для данного случая радиографическая чувствительность.

Расположение эталонов чувствительности. Эталоны чувствительности располагают на просвечиваемой детали в участке, представляющем наибольший интерес, и ориентируют так, чтобы они были перпендикулярны падающему излучению. Так как их используют для того, чтобы показать фактическое качество изображения на снимке, то их следует располагать в наименее выгодном положении детали, т. е. со стороны детали, обращенной к источнику излучения, где геометрическая нерезкость будет максимальна. Эталоны с канавками устанавливаются так, чтобы канавки были обращены к контролируемой детали.

§ 2. ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДИКА РАДИОГРАФИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ [10, 18—20]

Организация радиографического контроля. На крупных промышленных предприятиях для проведения дефектоскопического контроля качества материалов и выпускаемой продукции организуют лаборатории. В зависимости от характера и объема производства определяют структуру лабораторий. Для удобства организации работ лаборатории или их филиалы располагают в цехах, непосредственно в местах производства сварных, литых и других деталей.

Производительность радиографического контроля. Количество необходимой аппаратуры, производственная площадь помещений, занимаемых дефектоскопическими лабораториями, и численный состав работников групп определяется объемом контролируемой продукции с учетом производительности контроля.

В основном производительность радиографического контроля зависит от времени просвечивания, которое определяют по номограммам экспозиций с учетом плотности и толщины материала контролируемых изделий и в соответствии с выбранным рентгеновским аппаратом или радиоактивным источником излучения. Пропускная способность фотолаборатории должна соответствовать производительности просвечивания. В крупных лабораториях с большой пропускной способностью работники лаборатории подразделяются по роду выполняемых работ: расшифровщики, радиографы (занятые непосред-

ственной съемкой изделий) и лаборанты, занимающиеся фотообработкой экспонированных радиограмм, мастера, руководители смен и др.

Техническая документация. Основными документами, на основании которых лаборатория проводит контроль изделий, являются инструкции и технологические карты рентгено- или гамма-дефектоскопического контроля (табл. 22, 23, 24).

Инструкционные и технологические карты разрабатываются на все серийные детали, подлежащие радиографическому контролю, а также на ответственные детали и узлы уникальных и опытных конструкций и утверждаются главным металлургом (технологом) предприятия. В картах приводится чертеж детали (изделия), указывается порядок, схема и методика проведения контроля с использованием рентгеновского или γ -излучения, а также требования технических условий или нормы допустимых дефектов. В случае повышенных требований к какой-либо детали создается эталонная радиограмма с допустимыми и недопустимыми характерными дефектами. В некоторых случаях в качестве эталонной может быть выбрана радиограмма из числа снятых ранее. Эталонную радиограмму прилагают к инструкционным или технологическим картам и утверждают вместе с ними. Оценку качества изделия осуществляют по результатам расшифровки радиограммы с учетом требований технических условий и норм допустимых дефектов, приводимых в инструкционных и технологических картах. На изделиях, признанных годными, ставится клеймо согласно указаниям в карте контроля.

При просвечивании несерийных изделий, на которые отсутствует инструкционная или технологическая карта, решение о ее годности принимает не дефектоскопическая лаборатория (расшифровщик-радиограф), а главный инженер (конструктор) или главный металлург (технолог).

Результаты просвечивания регистрируются в журнале, и цеху выдается протокол контроля (табл. 25).

Деталь или партия деталей направляются в дефектоскопическую лабораторию в сопровождении служебной записки соответствующей формы (табл. 26). В служебной записке указываются номер детали, партия, количество деталей в партии, а при отсутствии инструкционных или технологических карт указываются также

Таблица 22

Инструкционная карта рентгено- (или гамма) -контроля

Завод № Цех №	Инструкционная карта рентгеноконтроля	Издание № Насос 015	Деталь № Крышка 00112	Материал АЛ-9	Режим просвечивания				Условия разбраковки
					напряже- ние, кв	ток, ма	время, мин	фокусное расстояние	
Положения просвечи- вания	Аппарат	Размер плен- ки	Тип пленки	Присособ- ление	Фольга	Размер плен- ки, мм	Тип пленки	Присособ- ление	Условия разбраковки
I положение	РУП-150-10	300×200	РТ-1	—	—	300×200	РТ-1	—	Дефекты допускаются по АМУ-300
II положение	*	200×150	РТ-1	Экра- ны	—	200×150	РТ-1	Экра- ны	Дефекты не допускаются со- гласно ТУ
III положение	*	100×150	РТ-1	Экра- ны	—	100×150	РТ-1	Экра- ны	Дефекты допускаются соглас- но эталонной радиограм- ме № 24

Эскиз детали

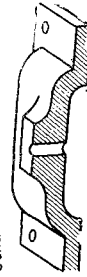
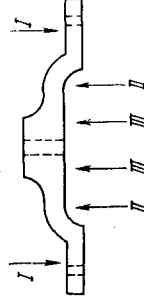


Схема просвечивания

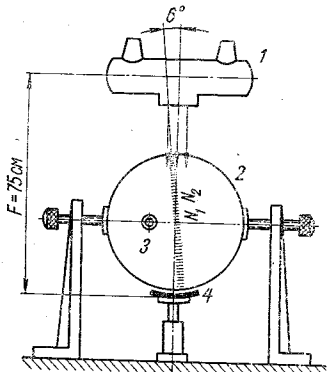


Внешние дефекты не являются браковочным признаком. Клеймо ударное
Забракованные детали цеху не выдаются без указания главного контролера

№	Наименование операции	Количество операций	Норма времени на операцию	Квалификация	Расценка	Деталь передана цеху	
						№	Дата
Составил	Начальник рентген. лаб.	Начальник ЦЗЛ	Главный металлург	Главный контролер	Согласовано с ОТК	Согласовано с ОТК	Дата

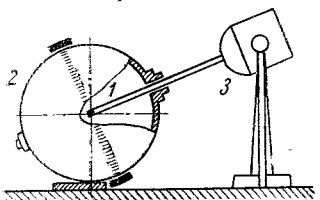
Рентгеноконтроль стальных баллонов

Технологическая карта 1

Схема просвечивания	Цель, порядок и методика контроля																																					
<p>Контроль сварного кольцевого шва шарового баллона</p>  <p>Схема рентгеновского просвечивания кольцевого шва шарового баллона: 1—рентгеновская трубка; 2—баллон; 3—штуцер; 4—пленка.</p>	<p>Контроль производится с целью выявления трещин, непроваров, включений (шлаковых и вольфрама), газовых пор и других дефектов сварки. Контролю подлежит сварной шов, соединяющий полусферы. Просвечивание производится на аппарате РУП-200-20-5 через две стенки (см. схему) на пленку РТ-1, помещенную между свинцовыми фольгами толщиной 0,08/0,08 мм. Кассету накладывают на контролируемый участок шва и прижимают приспособлением. Разметку участков кольцевого шва производить от штуцера слева направо.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Наименование просвечиваемого участка</th> <th rowspan="2">Диаметр баллона, мм</th> <th colspan="8">Режимы просвечивания</th> </tr> <tr> <th>Толщина просвечиваемого материала, мм</th> <th>Фокусное расстояние, мм</th> <th>Напряжение на трубке, кВ</th> <th>Ток трубки, ма</th> <th>Экспозиция, мин</th> <th>Размер пленки, см</th> <th>Толщина фольги, мм</th> <th>Количество снимков</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Кольцевой шов баллона</td> <td>480</td> <td>16</td> <td>750</td> <td>130</td> <td>10</td> <td>1,5</td> <td>8×21</td> <td>0,08/0,08</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>630</td> <td>20</td> <td>750</td> <td>155</td> <td>10</td> <td>1,0</td> <td>8×30</td> <td>0,08/0,08</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	Наименование просвечиваемого участка	Диаметр баллона, мм	Режимы просвечивания								Толщина просвечиваемого материала, мм	Фокусное расстояние, мм	Напряжение на трубке, кВ	Ток трубки, ма	Экспозиция, мин	Размер пленки, см	Толщина фольги, мм	Количество снимков	Кольцевой шов баллона	480	16	750	130	10	1,5	8×21	0,08/0,08	8	630	20	750	155	10	1,0	8×30	0,08/0,08	8
Наименование просвечиваемого участка	Диаметр баллона, мм			Режимы просвечивания																																		
		Толщина просвечиваемого материала, мм	Фокусное расстояние, мм	Напряжение на трубке, кВ	Ток трубки, ма	Экспозиция, мин	Размер пленки, см	Толщина фольги, мм	Количество снимков																													
Кольцевой шов баллона	480	16	750	130	10	1,5	8×21	0,08/0,08	8																													
	630	20	750	155	10	1,0	8×30	0,08/0,08	8																													

Гамма-контроль стальных баллонов

Технологическая карта 2

Схема просвечивания	Цель, порядок и методика контроля																											
<p>Контроль сварного кольцевого шва шарового баллона</p>  <p>Схема панорамного просвечивания кольцевого шва γ-излучением: 1—источник излучения; 2—баллон; 3—гамма-аппарат.</p>	<p>Контроль производится с целью выявления трещин, непроваров, включений (шлаковых и вольфрама), газовых пор и других дефектов сварки. Контролю подлежит сварной шов, соединяющий полусферы. Просвечивание производится γ-излучением ^{75}Se или ^{170}Tm через одну стенку путем введения источника излучения через штуцер с установкой его в центре шара (см. схему) на пленку РТ-1, помещенную между свинцовыми фольгами. Кассеты укладывают на сварной шов и закрепляют стягивающим хомутом. Для просвечивания используют гамма-установку типа РК-2 или УГД-3.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Наименование просвечиваемого участка</th> <th rowspan="2">Диаметр баллона, мм</th> <th rowspan="2">Толщина просвечиваемого материала, мм</th> <th rowspan="2">Источник излучения</th> <th rowspan="2">Фокусное расстояние, мм</th> <th rowspan="2">Экспозиция, г-экс Ra-ч</th> <th rowspan="2">Размер пленки, см</th> <th rowspan="2">Толщина фольги, мм</th> <th rowspan="2">Количество снимков</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Кольцевой шов баллона</td> <td>480</td> <td>8</td> <td>^{75}Se ^{170}Tm</td> <td>240 240</td> <td>0,012 0,07</td> <td>8×40 8×40</td> <td>0,1/0,2 0,05</td> <td>1 1</td> </tr> <tr> <td></td> <td>630</td> <td>10</td> <td>^{75}Se ^{170}Tm</td> <td>315 315</td> <td>0,04 0,15</td> <td>10×40 10×40</td> <td>0,1/0,2 0,05</td> <td>1 1</td> </tr> </tbody> </table>	Наименование просвечиваемого участка	Диаметр баллона, мм	Толщина просвечиваемого материала, мм	Источник излучения	Фокусное расстояние, мм	Экспозиция, г-экс Ra-ч	Размер пленки, см	Толщина фольги, мм	Количество снимков	Кольцевой шов баллона	480	8	^{75}Se ^{170}Tm	240 240	0,012 0,07	8×40 8×40	0,1/0,2 0,05	1 1		630	10	^{75}Se ^{170}Tm	315 315	0,04 0,15	10×40 10×40	0,1/0,2 0,05	1 1
Наименование просвечиваемого участка	Диаметр баллона, мм										Толщина просвечиваемого материала, мм	Источник излучения	Фокусное расстояние, мм	Экспозиция, г-экс Ra-ч	Размер пленки, см	Толщина фольги, мм	Количество снимков											
		Кольцевой шов баллона	480	8	^{75}Se ^{170}Tm	240 240	0,012 0,07	8×40 8×40	0,1/0,2 0,05	1 1																		
	630	10	^{75}Se ^{170}Tm	315 315	0,04 0,15	10×40 10×40	0,1/0,2 0,05	1 1																				

Физическая лаборатория
(рентгеновская)

Таблица 25

Протокол № _____
от «_____» _____ 196_____ г.
Направляется _____

Номер детали	Номер плавки или партии	Количество поступивших на контроль деталей	Количество деталей		Примечание
			годных	дефектных	

Начальник лаборатории
Испытание проводил

Таблица 26

«_____» _____ 196_____ г.

В физическую (рентгеновскую) лабораторию от цеха (отдела) _____

СЛУЖЕБНАЯ ЗАПИСКА

Направляется для исследования _____
в количестве _____ от партии _____
Необходимо дать заключение _____

слова проверки _____

Начальник цеха (отдела)

материал детали, места, подлежащие просвечиванию, и вид предполагаемого дефекта.

Регистрация результатов контроля и ведение архива.

Для организации учета радиограмм заводится специальный регистрационный журнал. В этот журнал заносятся наименование и номер контролируемого изделия, номера снимков (участков изделия), краткая характеристика схемы просвечивания, фокусное расстояние, напряжение на трубке или активность радиоактивного источника, тип пленки и усиливающих фольг и экранов, экспозиция и заключение о качестве контролируемого изделия по результатам расшифровки радиограмм. Регистрационный журнал вместе с расшифрованными снимками хранится в архиве. Срок хранения архива устанавливается на каждом предприятии в зависимости от характера контролируемого изделия и условий его эксплуатации. При таком порядке оформления результатов контроля в случае необходимости легко отыскать нужный снимок ранее проконтролированного изделия или его отдельного участка.

Таблица 27

Форма регистрационного журнала

Дата	Наименование детали и номер	Откуда поступила	Количество	Партия	Маркировка радиограмм	Режим контроля			Результаты контроля		Номер протокола	Контроль проводил	Примечание	
						Напряжение, кВ	Ток, мА	Время (сек, мин)	годные	брак				

Форма регистрационного журнала, в который заносятся результаты радиографического контроля для хранения их в архиве вместе с радиограммами, приводится в табл. 27.

Методика радиографирования. Контроль качества материалов и изделий радиографическим методом осуществляется в несколько этапов:

1. Подготовка к радиографированию.

2. Радиографирование (просвечивание контролируемого предмета ионизирующим излучением с регистрацией полученного изображения на рентгеновскую пленку).

3. Фотообработка рентгеновской пленки.

4. Расшифровка радиограмм (обнаружение дефектов в контролирующем изделии, определение их вида, формы и места расположения).

5. Заключение о качестве контролируемого изделия и оформление результатов контроля.

Подготовка к радиографированию. Номенклатура деталей и изделий, подлежащих радиографическому контролю, устанавливается на каждом предприятии в соответствии с техническими условиями на приемку выпускаемой продукции. Серийно выпускаемые детали, подлежащие контролю, направляются в дефектоскопическую лабораторию вместе с сопроводительным документом — технологической картой рентгено- или гамма-дефектоскопического контроля, в которой указываются название детали, номер ее чертежа, металл детали, участки детали, подлежащие просвечиванию, схема просвечивания, объем контроля (выборочный или стопроцентный) и нормы на допустимые дефекты. Перед радиографированием прежде всего необходимо ознакомиться с контролируемым объектом непосредственно или по чертежам, установить толщину и материал просвечиваемых участков и требования технических условий, предъявляемых к качеству изделия. В некоторых случаях при контроле несерийных изделий сопроводительный документ может отсутствовать. В этом случае необходимо составить эскиз изделия с указанием толщины и материала участков, подлежащих просвечиванию. Процесс подготовки к радиографированию включает в себя подготовку к просвечиванию контролируемого изделия, выбор источников излучения, схемы и режима просвечивания, обеспечивающих выявляемость дефектов в соответствии с требованиями технических условий к радиографированию, а также размещение аппаратуры, контролируемого изделия и кассеты с пленкой в положении для просвечивания в соответствии с выбранной схемой.

Подготовка контролируемого изделия к просвечиванию. К изделию, направляемому на радиографический контроль, предъявляется ряд требований. Контролируемое изделие должно поступать в дефектоскопическую лабораторию после устранения наружных дефек-

тов, очищенным от масла и других загрязнений. С литых изделий удаляются литники, прибыли и выпоры, а места под ними зачищаются заподлицо с поверхностью отливки. Поверхность литых изделий очищается от пригара, наростов, заливов, заусенцев и других неровностей. Сварные и паяные детали и изделия очищаются от шлака, флюса, земли и других загрязнений. Перед радиографированием необходимо тщательно осмотреть изделие, чтобы не допустить к просвечиванию изделие, имеющее наружные дефекты, так как изображения наружных дефектов затрудняют расшифровку радиограмм. При внешнем осмотре изделия могут быть обнаружены трещины или другие дефекты, выходящие на поверхность. В этом случае изделие просвечивается таким образом, чтобы обеспечить наилучшую выявляемость обнаруженных дефектов.

Если размеры контролируемого изделия не позволяют просветить его за одну экспозицию, необходимо произвести разметку изделия на участки по размерам снимка. Просвечиваемые участки отмечаются на изделии цветным карандашом (кроме красного) или мелом. Размеры просвечиваемого участка не должны превышать 0,7 величины фокусного расстояния.

Выбор схемы просвечивания. Определение направления просвечивания и места расположения кассеты с пленкой зависит от конфигурации контролируемого изделия и от вида дефектов, которые необходимо обнаружить. Большинство изделий, подлежащих радиографическому контролю, имеет сложную конфигурацию, что осложняет выбор схемы просвечивания. Тем не менее, в большинстве случаев изделия сложной формы можно разделить на участки относительно простой формы и при выборе схемы просвечивания руководствоваться типовыми схемами. Типовые схемы просвечивания отдельных узлов изделия разрабатываются с учетом технологии изготовления контролируемого изделия и обеспечивают наилучшую выявляемость дефектов, характерных для данного технологического процесса. Контроль сварных соединений с использованием ионизирующих излучений производится согласно ГОСТ 7512—55 (Швы сварные. Методы контроля рентгенографированием и гаммаграфированием).

На рис. 35 приводятся типовые схемы просвечивания сварных соединений и литых изделий.

Схемы просвечивания сварных соединений

Стыковые соединения. Швы стыковых соединений без скоса кромок и с отбортовкой двух кромок просвечивают в направлении, перпендикулярном плоскости свариваемых листов (рис. 35, эскизы 1, 2). Швы с односторонней и двусторонней разделкой кромок просвечивают по той же схеме (эскизы 3, 4, а). В некоторых случаях для лучшего выявления непроваров и трещин по кромке шва допускается просвечивание в направлении по скосу кромок (эскиз 4, б). Швы стыковых соединений могут просвечиваться в направлении, обратном показанному на эскизах 1—4, и с расположением кассеты с пленкой с другой стороны шва.

Угловые соединения. Швы угловых соединений с отбортовкой кромок просвечивают в направлении плоскости сваренных кромок (эскиз 5). Швы угловых соединений без скоса кромок и со скосом двух кромок просвечивают в направлении биссектрисы угла между сваренными элементами (эскизы 6, 7). Допускается также обратное направление просвечивания с расположением пленки по другую сторону шва.

Тавровые соединения. Швы тавровых соединений без скоса кромок просвечивают под углом 45° к полке тавра (эскиз 8). Швы тавровых соединений с односторонним и двусторонним скосом кромок просвечивают под углом 45° к полке тавра (эскизы 9, а, 10, а). В некоторых случаях для лучшего выявления дефектов сварки по кромке шва допускается просвечивание в направлении скоса кромок. Возможно и обратное направление просвечивания с размещением пленки по другую сторону шва (эскизы 9, б, 10, б).

Соединения внахлестку. Швы соединений внахлестку просвечивают под углом 45° к плоскости сваренных листов (эскизы 11, б, 12). Допускается просвечивание в направлении, перпендикулярном плоскости сваренных листов (эскиз 11, а). Швы соединений внахлестку точечной и роликовой сварки просвечивают в направлении, перпендикулярном плоскости сваренных листов (эскизы 13, 14).

Сварные швы в типовых конструкциях. Швы двутавровых и крестообразных конструкций просвечивают по схемам, приведенным на эскизе 15. Швы в коробчатых конструкциях, форма которых не позволяет поме-

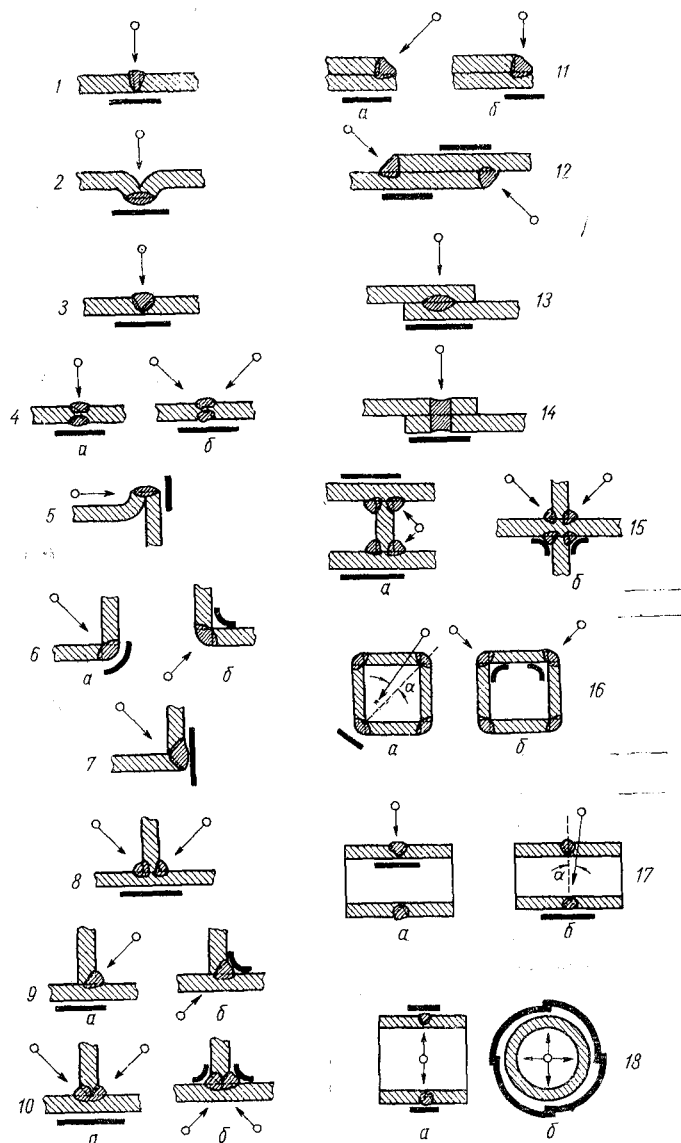


Рис. 35. Типовые схемы просвечивания сварных изделий:

○ — источник излучения; → — направление просвечивания;
 — кассета с пленкой.

стить внутри них кассету с пленкой или источник излучения, просвечивают по схеме, показанной на эскизе 16, а. Пленку устанавливают с наружной стороны шва и просвечивают его через две стенки под углом α к оси шва изделия, равным $5-10^\circ$. Если можно разместить кассету внутри коробчатой конструкции, то в этом случае просвечивание ведут через одну стенку в направлении биссектрисы угла между сваренными элементами (эскиз 16, б).

Продольные швы цилиндрических изделий. Схемы просвечивания продольных швов цилиндрических изделий аналогичны схемам просвечивания швов коробчатых конструкций. Просвечивание осуществляется через две или через одну стенку в направлении, перпендикулярном шву (эскиз 16).

Кольцевые швы. Кольцевые швы в цилиндрических и других изделиях, конструкция которых позволяет поместить кассету с пленкой внутрь изделия, просвечивают через одну стенку (с установкой источника излучения снаружи изделия) в направлении, перпендикулярном шву (эскиз 17, а). Кольцевые швы в изделиях, конструкция которых не позволяет поместить внутри них кассету с пленкой или источник излучения, просвечивают через две стенки (эскиз 17, б) под углом α к оси шва, равным $5-10^\circ$, так, чтобы изображения двух противоположных участков шва не накладывались друг на друга (метод эллиптической проекции). При этом допускается размещение эталонов чувствительности между пленкой и просвечиваемым участком шва. Чтобы получить изображение шва целиком, просвечивание осуществляют в два приема. После первой экспозиции изделие поворачивают на 90° вокруг оси.

Кольцевые швы в цилиндрических или сферических изделиях могут просвечиваться по всей длине одновременно при расположении источника излучения на оси цилиндра против шва (или в центре сферы) и наложении кассет с пленкой по всей длине шва на наружной поверхности (эскиз 18) — панорамное просвечивание. Кассеты надо расположить так, чтобы пленки накладывались одна на другую на $10-15$ мм. При просвечивании изделий больших диаметров для повышения производительности контроля и улучшения выявляемости дефектов следует стремиться к просвечиванию через одну стенку за одну экспозицию.

Схемы просвечивания литых изделий

Тепловые узлы отливок. В угловых участках отливок, называемых тепловыми узлами, наиболее вероятно образование таких дефектов литья, как усадочные раковины и трещины.

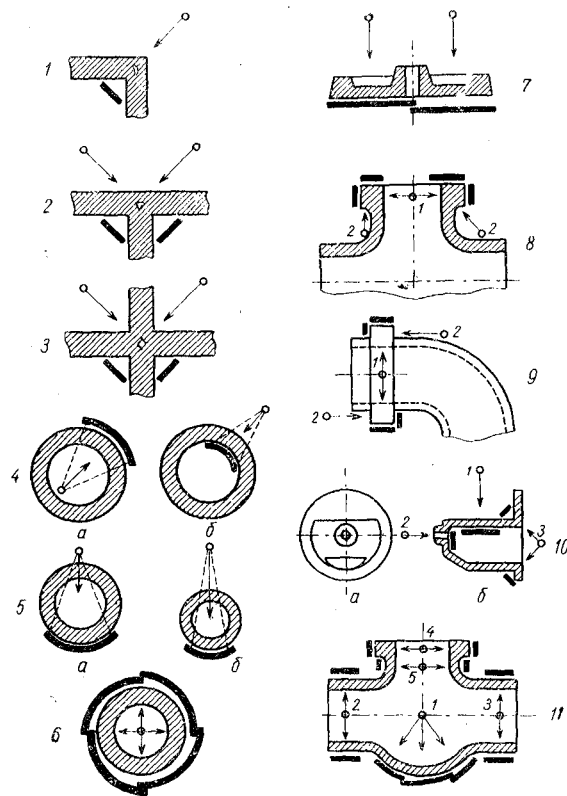


Рис. 36. Типовые схемы просвечивания литых изделий:

○ — источник излучения; → — направление просвечивания; — — кассета с пленкой.

винны и трещины. Угловые участки Г-образной формы просвечивают под углом 45° к плоскостям, образующим угол (или по биссектрисе угла) (рис. 36, эскиз 1). Угловые участки Т-образной и Х-образной формы просвечивают в двух взаимно перпендикулярных направлениях (эскизы 2, 3).

Цилиндрические участки отливок. Цилиндрические участки литых изделий (трубы, цилиндры) с диаметром более 500 мм при наличии доступа внутрь просвечивают по участкам через одну стенку. Просвечивание осуществляют как изнутри, так и снаружи по схемам, изображенным на эскизах 4, а и 4, б. При просвечивании цилиндрических изделий по участкам оптическая плотность на краях снимка оказывается значительно меньше, чем в центре. Это обусловлено тем, что по мере увеличения угла расхождения пучка излучений возрастает эффективная толщина материала, просвечиваемого в наклонном направлении. Практически при просвечивании цилиндрических изделий эффективная толщина в наклонном направлении просвечивания должна не более чем на 15—20% превышать толщину, просвечиваемую в прямом направлении.

В соответствии с этим цилиндрическое изделие, подлежащее просвечиванию за несколько экспозиций, разбивают на несколько участков, количество которых N находят по формуле

$$N \approx 4 \frac{D}{d},$$

где D — наружный диаметр изделия; d — внутренний диаметр изделия; N — ближайшее целое число.

Цилиндрические участки литых изделий среднего (от 500 до 200 мм) и малого (менее 200 мм) диаметра, а также участки большого диаметра при отсутствии доступа внутрь изделия просвечивают через две стенки. Цилиндры большого и среднего диаметра просвечивают таким образом, чтобы получить изображение одной стенки изделия. Для этого источник излучения располагают на внешней стороне стенки, противоположной просвечиваемому участку (эскиз 5, а). Трубы и цилиндры малого диаметра просвечивают при большом фокусном расстоянии; при этом удается на одной пленке получить удовлетворительное изображение обеих просвечиваемых стенок (эскиз 5, б). Однако в этом случае оптическая плотность по краям изображения оказывается недостаточной вследствие возрастания эффективной толщины материала. Чтобы получить полное представление о качестве изделия, необходимо его просвечивать в два приема с поворотом на 90° вокруг оси после первого просвечивания.

Трубы и цилиндры, а также полые отливки, имеющие доступ внутрь при наличии соответствующей аппаратуры (трубка с выносным анодом или радиоактивный источник излучения), можно просвечивать за одну экспозицию при расположении источника в центре изделия — панорамное просвечивание (эскиз 6). Во всех случаях, когда позволяют обстоятельства, необходимо стремиться к просвечиванию через одну стенку, так как при этом получают снимки лучшего качества.

Отливки с плоскопараллельными гранями. Плоскопараллельные отливки просвечивают целиком за одну экспозицию или по участкам в направлении, перпендикулярном плоскости изделия (эскиз 7).

Литые фланцы. В литых изделиях с резким перепадом толщины в местах перехода от тонких сечений к толстым наиболее вероятно появление трещин. Типичный пример таких изделий представляют отливки с фланцами. Помимо панорамного просвечивания (эскизы 8, 9, положение 1), для выявления возможных трещин фланец просвечивают в перпендикулярном направлении или под углом (до 45°) к плоскости фланца (эскизы 8, 9, положение 2).

Отливки сложной формы. Литые изделия сложной формы перед просвечиванием разбивают на участки, которые просвечивают по типовым схемам. На эскизе 10 показана схема просвечивания некоторых участков литого корпуса. Плоская часть корпуса просвечивается из положения 1, втулка — из положения 2, а угловые участки — под углом 45° к плоскостям, образующим угол, из положения 3.

На эскизе 11 изображена схема просвечивания различных участков литого тройника. Шаровую часть просвечивают из положения 1 за одну экспозицию при просвечивании изнутри или за несколько экспозиций при просвечивании снаружи. Для просвечивания боковых патрубков источник излучения размещают на горизонтальной оси тройника в положения 2 и 3. Для просвечивания верхнего патрубка источник устанавливают на вертикальной оси тройника. Так как толщина патрубка с фланцем значительно превышает толщину стенок патрубка, просвечивание осуществляют за две экспозиции из положений 4 и 5.

Применение компенсаторов. В практике радиографирования часто встречаются изделия с резким переходом

от тонких сечений к толстым. Хотя размеры изделия и позволяют произвести его просвечивание за одну экспозицию, однако при этом невозможно получить качественный снимок. Участки радиограммы, находящиеся под толстыми сечениями изделия, оказываются недодержанными, в то время как другие участки пленки под тонкими сечениями изделия оказываются передержанными. Слишком высокая оптическая плотность снимка, так же как и слишком низкая, значительно ухудшают радиографическую чувствительность, и выявляемость дефектов снижается. Для получения качественных радиограмм при контроле изделий с высоким радиографическим контрастом (с резким перепадом толщин) приходится просвечивать их за две (или более) экспозиции при различных режимах, но при этом снижается производительность контроля. Можно избежать повторного просвечивания изделия, если принять специальные меры по выравниванию его радиографического контраста.

На рис. 37 приводятся основные типы компенсаторов, применяемых в радиографии для выравнивания радиографического контраста контролируемых изделий, и схемы их применения.

Твердые компенсаторы. При контроле серийно выпускаемых изделий удобно применять твердые компенсаторы, которые изготавливаются из того же материала, что и контролируемое изделие. Поверхность компенсаторов имеет такую форму, чтобы при наложении их на контролируемое изделие суммарная толщина компенсатора и изделия в любом месте в направлении просвечивания была одинакова (эскиз 1, 2).

Насыпные компенсаторы. Для изделий сложной формы или несерийных изделий твердые компенсаторы нецелесообразно. В этом случае можно применять насыпные компенсаторы (металлический порошок или дробь). Насыпную плотность порошка или дроби подбирают примерно равной плотности материала контролируемого изделия. Перед просвечиванием изделие помещают в сосуд или окружают свинцовой маской и засыпают порошок или дробью (эскизы 3, 4).

Жидкие компенсаторы. Когда не имеется необходимого порошка или дроби или их применение создает неудобства (например, при просвечивании полых емкостей с небольшим отверстием), можно применять жидкие компенсаторы. Компенсирующую жидкость составляют

из смеси различных веществ таким образом, чтобы коэффициент ослабления излучения в ней был равен или близок коэффициенту ослабления излучения в материале контролируемого изделия. Просвечиваемое изделие по-

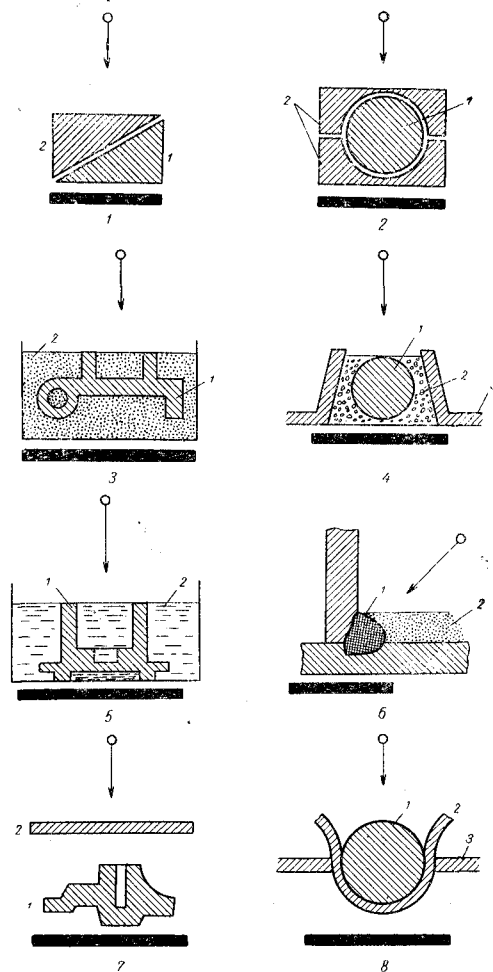


Рис. 37. Схема применения компенсаторов в радиографии:

○ — источник излучения; → — направление просвечивания; — — — — — кассета с пленкой; 1 — просвечиваемое изделие; 2 — компенсатор; 3 — свинцовая маска.

мешают в сосуд и заливают компенсатором, так, чтобы он был на одном уровне с изделием (рис. 37, эскиз 5).

Пастообразные компенсаторы. В некоторых случаях применять вышеописанные компенсаторы нельзя, например при контроле вертикальных и потолочных швов сварных конструкций. В этих случаях целесообразно применять компенсирующую пасту, состоящую из связующих жировых веществ и металлических (свинцовых) опилок. Содержание металлических опилок определяется из условия равенства коэффициентов ослабления излучения пасты и материала изделия. Перед просвечиванием пасту наносят на изделие подобно замазке (эскиз 6).

Компенсирующие экраны. Широкое применение получили компенсирующие экраны из свинца (эскизы 7, 8). Выравнивающее действие таких экранов основано на том, что они отфильтровывают длинноволновую часть излучения, вследствие чего прошедшее через экраны излучение становится более однородным и проникающим, а потому менее контрастным.

Применение экрана равносильно увеличению толщины просвечиваемого изделия во всех точках на одну и ту же величину. При этом относительное изменение толщины уменьшается и радиографический контраст контролируемого изделия выравнивается.

Увеличение энергии излучения. В случаях, когда неприменим ни один из описанных выше способов, выравнивание радиографического контраста просвечиваемого объекта можно достигнуть увеличением энергии излучения, так как при этом уменьшается коэффициент ослабления излучения. При этом выравнивающее действие, вызываемое увеличением энергии излучения, аналогично действию компенсирующих экранов из свинца.

При радиографировании нужно учитывать тот факт, что применение компенсаторов, особенно применение свинцовых экранов и увеличение энергии излучения, приводит к ухудшению выявляемости дефектов.

Выбор источника излучения. Выбор источника излучения осуществляется в зависимости от толщины и плотности материала контролируемого изделия с учетом областей применения рентгеновского и γ -излучения в дефектоскопии (см. табл. 7, 10). Кроме того, выбор источника излучения определяется необходимой чувствительностью радиографического метода контроля, его

производительностью и технологией проведения контроля. Этими параметрами определяется вид излучения (рентгеновское или γ -излучение), необходимая энергия излучения (или напряжение на трубке), интенсивность излучения (ток трубки или активность радиоактивного источника излучения), которые в свою очередь определяют выбор типа рентгеновского аппарата или гамма-аппарата с соответствующим радиоактивным источником.

Выбор фотоматериалов. Выбирают рентгеновскую пленку в зависимости от требуемой чувствительности и производительности радиографического контроля с учетом областей применения пленок в радиографии по диаграмме (см. рис. 23) или табл. 12.

Зарядка и установка кассет. Перед радиографированием рентгеновскую пленку помещают в светонепроницаемую кассету. Для просвечивания плоских изделий и изделий небольшого размера применяют жесткие кассеты. Однако в практике радиографирования в связи с большим разнообразием просвечиваемых изделий более широкое применение получили гибкие кассеты — двойные конверты из черной светонепроницаемой бумаги. Схемы зарядки кассет приведены на рис. 27. Для просвечивания легких сплавов или тяжелых сплавов небольшой толщины пленку помещают между двумя металлическими фольгами. Просвечивание толстостенных изделий излучением средней энергии (при средних напряжениях на трубке) осуществляют на пленку, помещенную между двумя флуоресцирующими экранами. При просвечивании особо ответственных узлов и деталей, а также при просвечивании в сложных условиях в кассету закладывают по две пленки, для того чтобы избежать повторного просвечивания в случае повреждения эмульсии одной из пленок.

Заряжают кассеты в затемненной фотолаборатории при красном свете или в полной темноте (в зависимости от применяемых фотоматериалов). При зарядке кассет необходимо обеспечить плотный контакт между пленкой и металлической фольгой или флуоресцирующим экраном. С этой целью можно применять вакуумные кассеты из резины, из которых после зарядки воздух откачивают с помощью ручного насоса.

После зарядки кассет и подготовки изделия к просвечиванию кассеты крепят на изделии в соответствии

с выбранной схемой просвечивания. При установке кассет необходимо помнить, что дефекты лучше выявляются в том случае, если они расположены ближе к пленке. Конструкция приспособлений для крепления кассет к изделию определяется размерами и конфигурацией просвечиваемых изделий, а также особенностями применяемой схемы просвечивания. Приспособления должны обеспечивать плотное и равномерное прилегание кассеты к просвечиваемому участку изделия. Средства крепления кассет могут быть самыми разнообразными (например, тесьма, изоляционная лента, провод, пластилин, специальные пружинные и магнитные прижимы). Во всех случаях за кассетой по ходу излучения необходимо располагать лист свинца или просвинцованной резины толщиной 5—6 мм. Эта мера предохраняет пленку от воздействия обратно рассеянного излучения. Участки пленки, выходящие за пределы просвечиваемого изделия, желательно закрыть листовым свинцом.

Если просвечивание изделия осуществляется по частям, то размер пленок выбирают несколько большим, чем просвечиваемые участки, а кассеты устанавливают таким образом, чтобы изображения на двух смежных снимках частично перекрывались. Ширина перекрытия изображений на смежных снимках должна быть не менее 2—3 см, чтобы на обоих снимках был виден маркировочный знак, отмечающий границу между просвечиваемыми участками.

Маркировка радиограмм. Все просвечиваемые изделия или его участки маркируют рядом цифр и знаков. Маркировочные цифры и знаки изготовляют из свинца (отливают или вырезают из листового свинца специальным прессом) и устанавливают на контролируемое изделие или рядом с ним на кассету. Система маркировки должна содержать номер детали или изделия, порядковый номер при просвечивании (или порядковый номер участка) и стрелку-указатель для разметки дефектных мест. Маркировка радиограмм необходима при их расшифровке и обработке результатов радиографического контроля. Маркировочные знаки заносят в регистрационный журнал вместе с режимами просвечивания, благодаря чему легко отыскать нужный снимок в архиве.

Помимо системы маркировки на каждой радиограмме должно быть отчетливое изображение эталона чувствительности, по которому определяется качество ра-

диограммы и достигнутая чувствительность. В случае неудовлетворительного качества радиограммы или если достигнутая чувствительность не соответствует требованиям, режимы просвечивания корректируются и производится повторное просвечивание. При повторном контроле к системе маркировки добавляется буква «П».

Выбор режима просвечивания. Выбор режима просвечивания состоит в определении фокусного расстояния, напряжения на аноде рентгеновской трубки (или активности радиоактивного источника излучения) и величины экспозиции.

Выбор фокусного расстояния. Фокусное расстояние при просвечивании выбирают, исходя из толщины просвечиваемых материалов и требуемого поля облучения. Необходимо стремиться производить просвечивание при таком фокусном расстоянии, при котором геометрическая нерезкость изображения равна половине внутренней нерезкости пленок. При выполнении этого условия достигается наилучшая выявляемость дефектов. Практически при радиографировании фокусные расстояния ограничиваются либо конфигурацией и размерами просвечиваемого изделия, либо допустимым временем экспозиции.

Выбор напряжения на трубке (выбор радиоактивного источника). Напряжение на трубке или энергию излучения радиоактивного источника выбирают с учетом областей применения ионизирующих излучений в дефектоскопии (см. табл. 7, 10) в зависимости от толщины просвечиваемого материала или изделия и от требуемой производительности радиографирования.

Определение экспозиций. Продолжительность экспозиций в каждом конкретном случае определяется по номограммам экспозиций. Время просвечивания зависит от толщины и плотности просвечиваемого материала, напряжения и тока трубки (или активности радиоактивного источника), фокусного расстояния и применяемых пленок, металлических фольг и флуоресцирующих экранов (см. гл. 4).

Установка источника излучения. После того, как изделие подготовлено к просвечиванию, укреплены кассеты и маркировочные знаки, выбраны необходимый источник излучения, фокусное расстояние и установлена продолжительность экспозиции, источник излучения устанавливают в положение для просвечивания. При

установке источника в исходное положение необходимо следить, чтобы направление излучения соответствовало выбранной схеме просвечивания. Для этой цели целесообразно применять центратор, состоящий из двух телескопически раздвигающихся трубок, укрепленных в центре обода, перпендикулярно его плоскости. Обод центратора крепится на выходном окне рентгеновского или гамма-аппарата, а направление трубок соответствует центральному лучу пучка излучения.

Источник излучения или контролируемый предмет перемещают так, чтобы трубки центратора были направлены на середину кассеты с пленкой. После ориентации источника излучения в необходимом направлении и установки его на выбранном фокусном расстоянии от изделия с пленкой центратор убирают и приступают к просвечиванию изделия. При панорамном просвечивании в исходное положение устанавливают выносной анод рентгеновской трубки или ампулопровод гамма-аппарата.

Просвечивание изделия. Перед просвечиванием изделия рентгеновским излучением на рентгеновском аппарате устанавливают необходимое напряжение, анодный ток и продолжительность экспозиции. Время экспозиции устанавливают с помощью реле времени, которое отсчитывает время с момента включения рентгеновского аппарата и автоматически отключает высокое напряжение с трубки по истечении времени, установленного на реле. В отсутствие реле времени или при невозможности его использования продолжительность экспозиции измеряют по секундомеру с момента включения аппарата. В гамма-аппаратах с механическим управлением источник излучения перемещают в положение для просвечивания при включении аппарата. Длительность экспозиции в некоторых гамма-аппаратах также устанавливается с помощью времени, и по истечении установленного на нем времени автоматически срабатывает система возврата источника в положение «хранение». В большинстве переносных гамма-аппаратов источник перемещают вручную с помощью дистанционного привода, а продолжительность экспозиции измеряют по секундомеру. Управление рентгеновской установкой или манипулирование источником в гамма-аппарате осуществляется с пульта управления, расположенного в месте, защищенном от действия ионизиру-

щего излучения или удаленном на безопасное расстояние.

Фотообработка радиограмм. После просвечивания экспонированную рентгеновскую пленку подвергают фотообработке (см. гл. 4). Процесс фотообработки может длиться от 1 до 5 ч в зависимости от оснащенности фотолaborатории. Применение автоматической фотообработки пленки позволяет сократить это время до 30—50 мин. По окончании фотообработки просушенные снимки поступают на расшифровку.

Расшифровка радиограмм. Самым ответственным этапом работ в проведении радиографического контроля является расшифровка снимков. Радиограммы, направляемые на расшифровку, не должны иметь дефектов, обусловленных неправильной фотообработкой или неправильным режимом просвечивания, так как такие дефекты затрудняют расшифровку изображения на снимке и могут привести к неверной оценке качества контролируемого изделия. Снимок признается годным для расшифровки, если на нем отчетливо видны изображения эталона чувствительности и маркировочных знаков. Задача расшифровки — обнаружение дефектов в контролируемом изделии, их формы, вида и величины, а иногда и места расположения. Расшифровка радиограмм должна проходить в условиях, обеспечивающих наилучшую выявляемость дефектов и других деталей исследуемого объекта. Для этой цели применяют специальный осветитель — негатоскоп. Негатоскоп представляет собой устройство, состоящее из осветительных ламп, закрытых матовым стеклом. Негатоскоп должен удовлетворять следующим требованиям:

1. Освещение должно быть равномерным по всей поверхности окна негатоскопа.

2. Яркость освещения должна регулироваться в широких пределах, чтобы можно было рассматривать снимки с различной оптической плотностью, изменяющейся в пределах от 1 до 2.

3. Матовое стекло негатоскопа должно быть пригодным для рассматривания снимка размером 300 × 400 мм. Для выделения на снимке отдельного поля и для рассматривания снимков меньшего размера должна быть предусмотрена штормая диафрагма.

Радиограмму помещают на стекло негатоскопа и рассматривают в проходящем свете. В процессе рас-

шифровки снимков выявляются различные дефекты в виде нарушений сплошности материала изделия, возникающие при сварке, пайке, литье и других технологических процессах. По результатам расшифровки снимков делают заключение о качестве изделия.

Оценка качества изделия. Качество изделия оценивают по данным расшифровки о количестве, виде и величине обнаруженных дефектов с учетом технических условий и норм на допустимые дефекты. Заключение о годности изделия можно делать по эталонной радиограмме с характерными дефектами путем сравнения с ней снимка контролируемого изделия. Если нет технических условий на просвечивание, как, например, при контроле несерийных деталей, заключение о годности изделия делают согласно чертежу или другим техническим документам, утвержденным в установленном на заводе порядке. На деталях, признанных годными, ставят клеймо — ударным или электрографическим методом согласно указаниям в карте контроля. В случае необходимости на изделии размечают дефектные места. При разметке дефектных мест в качестве ориентира используют стрелку-указатель, а дефектные участки отмечают красным карандашом.

Оформление результатов контроля и сдача их в архив. По окончании составления заключения о качестве проконтролированных изделий результаты контроля регистрируют в специальном журнале учета работ. Зарегистрированные радиограммы вместе с заполненным журналом направляют в архив.

§ 3. РЕЖИМЫ РАДИОГРАФИРОВАНИЯ [10]

Режимы просвечивания материалов рентгеновским излучением. Режимы просвечивания рентгеновским излучением деталей, узлов и изделий из сплавов на основе железа, титана, алюминия и магния определяют по номограммам, приведенным на рис. 38—41. Найденные по данным номограммам режимы просвечивания могут не вполне отвечать конкретным условиям радиографирования и должны быть скорректированы применительно к этим условиям с учетом характерных особенностей применяемой аппаратуры, контролируемых изделий, применяемых рентгеновских пленок, усиливающих металлических фольг и флуоресцирующих экра-

нов, фотообработки радиограмм и других факторов. **Переходные коэффициенты.** При определении времени просвечивания на рентгеновскую пленку, отличную от пленки, для которой построены номограммы экспо-

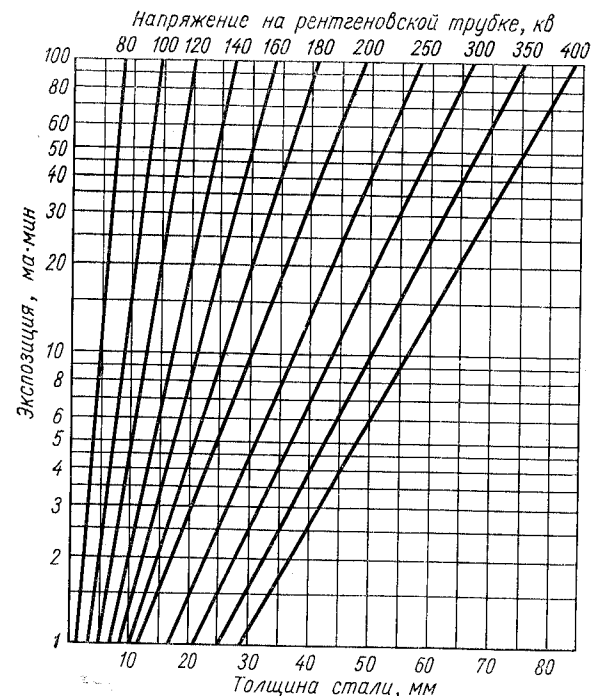


Рис. 38. Номограмма для определения экспозиций просвечивания сплавов на основе железа на пленку РТ-1 (фокусное расстояние 75 см, $D=1,3-1,5$) с оловянисто-свинцовыми фольгами толщиной 0,05 мм рентгеновским излучением.

зиций (см. рис. 38—45), пользуются переходными коэффициентами K , характеризующими чувствительность различных типов пленок к излучению при одинаковых условиях просвечивания и способе зарядки кассет. Переходным коэффициентом для данного типа пленки называют отношение времени просвечивания на пленку данного типа к времени просвечивания на пленку, для которой построена номограмма, при постоянной оптической плотности радиограмм. Переходный коэффи-

коэффициент K определяют по формуле:

$$K = \frac{t}{t_0},$$

где t — время просвечивания на пленку данного типа; t_0 — время просвечивания, найденное по номограмме экспозиций.

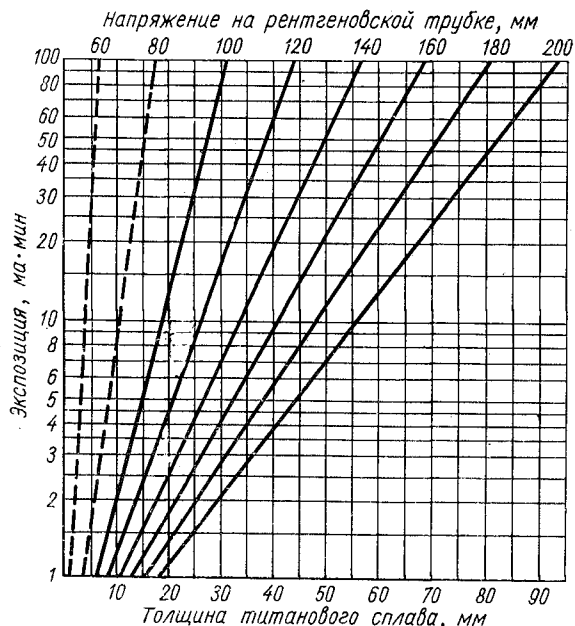


Рис. 39. Номограмма для определения экспозиций просвечивания титановых сплавов на пленку РТ-1 (фокусное расстояние 75 см, $D=1,3-1,5$) рентгеновским излучением:

--- без усиливающих экранов; — с оловянисто-свинцовыми фольгами толщиной 0,05 мм.

Значения переходных коэффициентов для рентгеновских пленок типа РТ-1, РТ-2, РТ-3, РТ-4 и РТ-5 и Р-Х приведены в табл. 28.

Для определения времени просвечивания материала при использовании любой из указанных в таблице пленок при различных способах зарядки кассет время просвечивания, найденное по номограмме экспозиций, необходимо умножить на соответствующий переходной коэффициент

$$t = Kt_0.$$

Таблица 28

Значения переходных коэффициентов K для различных типов рентгеновских пленок и способов зарядки кассет

Схема зарядки кассет	Переходный коэффициент K для пленок типа					
	РТ-1	РТ-2	РТ-3	РТ-4	РТ-5	Р-Х
Пленка без усиливающих экранов	2	4	3,5	10	30	6
Пленка с металлическими усиливающими экранами	1*	2	1,8	5	15	3
Пленка с флуоресцирующими усиливающими экранами:						
«Стандарт»	1,5	0,29	1,2	2,9	14	—
УФД-П/2	0,77	0,14	0,58	1,4	6,8	—
УФД-П/3	0,51	0,09	0,39	0,95	4,5	—
СБ	0,91	0,17	0,70	1,7	8,1	—

* Переходный коэффициент для пленки РТ-1 с металлическими усиливающими экранами принят за единицу.

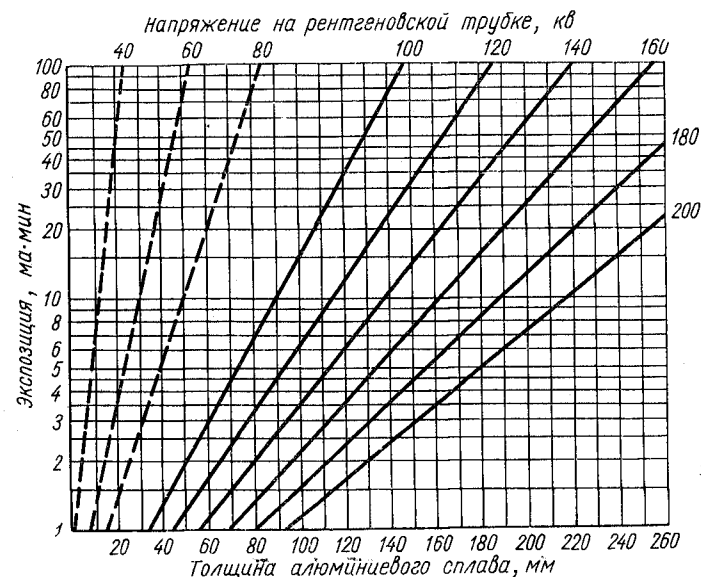


Рис. 40. Номограмма для определения экспозиций просвечивания алюминиевых сплавов на пленку РТ-1 (фокусное расстояние 75 см, $D=1,3-1,5$) рентгеновским излучением.

--- без усиливающих экранов; — с оловянисто-свинцовыми фольгами толщиной 0,05 мм.

Переходные коэффициенты определяются по чувствительности рентгеновских пленок при напряжении на рентгеновской трубке 80 кВ и оптической плотности снимка, равной 1,5. Значение этих коэффициентов ме

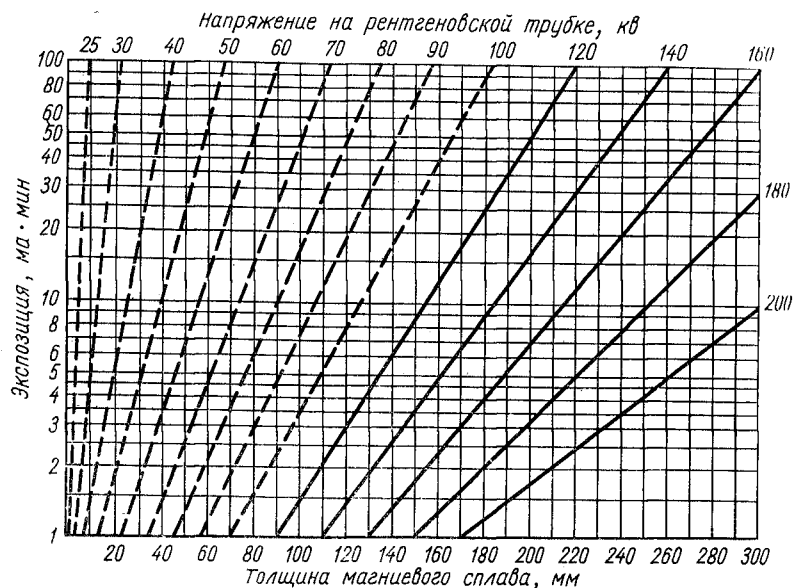


Рис. 41. Номограмма для определения экспозиций просвечивания магниевых сплавов на пленку РТ-1 (фокусное расстояние 75 см, $D=1,3-1,5$) рентгеновским излучением.
 --- без усиливающих экранов; — с оловянисто-свинцовыми фольгами 0,05 мм.

няется в зависимости от качества применяемой рентгеновской пленки, времени ее хранения, состава проявителя, режимов просвечивания, энергии излучения и т. д.

Фокусное расстояние. При режимах просвечивания с фокусным расстоянием, отличным от приводимого в номограммах, экспозицию просвечивания приближенно можно определить по формуле

$$E = E_0 \frac{F^2}{F_0^2},$$

где E — экспозиция просвечивания при выбранном фокусном расстоянии F ; E_0 — экспозиция просвечивания

при фокусном расстоянии F_0 , определенная по номограмме.

Просвечивание под углом. При просвечивании материала под большим углом к его поверхности экспозиция просвечивания определяется по толщине, рассчитанной по формуле

$$d_a = \frac{d}{\cos \alpha},$$

где d — толщина просвечиваемого материала; α — угол между направлением излучения и перпендикуляром к поверхности материала.

Радиографирование изделий из сложных веществ. При радиографировании изделий из материалов, отличающихся по плотности от материалов, для которых построены номограммы экспозиций, время просвечивания определяют по толщине одного из этих материалов, эквивалентной толщине контролируемого материала. Эквивалентную толщину материала определяют по формуле

$$d_{\text{экр}} = d_x \frac{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_x \rho_x}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \rho},$$

где $d_{\text{экр}}$ и ρ — эквивалентная толщина и плотность сплава, для которого построена номограмма; d_x и ρ_x — толщина и плотность материала контролируемого изделия; $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)$ и $\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_x$ — массовые коэффициенты ослабления рентгеновского излучения материалом, для которого построена номограмма, и материалом, для которого определяется эквивалентная толщина, при заданных напряжениях на рентгеновской трубке, способе зарядки кассет, типе пленки и фокусном расстоянии.

Массовый коэффициент ослабления для сложных веществ равен

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 \eta_1 + \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 \eta_2 + \dots,$$

где η_1, η_2 — относительная весовая доля данного элемента в сложном веществе.

Коэффициенты эквивалентности при радиографическом исследовании некоторых материалов

Металл	Рентгеновское излучение при напряжении на аноде трубки, кВ							Излучение бетатрона 15—30 Мэв	γ-Излучение радиоактивных изотопов					
	50	100	150	200	400	1000	2000		¹⁷⁰ Tu	⁷⁵ Se	¹⁹² Ir	¹³⁷ Cs	¹⁵² Eu	⁶⁰ Co
Магний	0,03	0,06	0,12	0,18	0,22	0,23	0,24	0,19	0,16	0,18	0,22	0,23	0,23	0,23
Алюминий	0,05	0,08	0,16	0,25	0,32	0,34	0,34	0,26	0,29	0,32	0,34	0,34	0,34	0,34
Титан	0,35	0,37	0,42	0,50	0,54	0,57	0,57	0,50	0,52	0,54	0,56	0,57	0,57	0,57
Сталь	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Никель	1,44	1,39	1,35	1,27	1,18	1,15	1,15	1,21	1,22	1,19	1,15	1,15	1,15	1,15
Медь	1,52	1,46	1,39	1,29	1,15	1,11	1,11	1,21	1,21	1,15	1,11	1,11	1,11	1,11
Цинк	1,35	1,28	1,21	1,09	0,95	0,90	0,90	1,0	1,0	0,95	0,91	0,90	0,90	0,90
Молибден	4,51	4,42	3,79	2,65	1,62	1,29	1,26	1,66	2,14	1,82	1,31	1,29	1,26	1,26
Вольфрам	—	—	27,8	18,6	6,75	2,83	2,47	4,04	10,6	9,53	4,96	4,21	3,47	3,21
Свинец	—	—	21,1	14,1	4,94	2,15	1,95	2,51	7,32	6,94	3,85	3,28	2,26	2,23

Примечание. Коэффициенты эквивалентности для стали приняты равными единице.

Значения массовых коэффициентов ослабления излучения в материалах приводятся в приложении 1.

Радиографические коэффициенты эквивалентности. Эквивалентную толщину стали для некоторых металлов можно найти по радиографическим коэффициентам эквивалентности, приводимым в табл. 29. Эквивалентная толщина стали равна произведению толщины контролируемого металла на соответствующий радиографический коэффициент эквивалентности.

Режимы просвечивания материалов γ-излучением. Режимы просвечивания деталей, узлов и изделий из сталей на основе железа, титана, алюминия и магния γ-излучением радиоактивных источников ¹⁷⁰Tm, ⁷⁵Se, ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs, ¹⁵²Eu и ⁶⁰Co определяются по номограммам, приведенным на рис. 42—45.

При определении времени просвечивания на рентгеновскую пленку, отличную от пленки, для которой построены номограммы экспозиции, необходимо пользоваться переходными коэффициентами *K*, указанными в табл. 28. При определении по номограммам экспозиций просвечивания материалов при фокусном расстоянии, отличном от фокусных расстояний, для которых построены номограммы, необходимая экспозиция просвечивания находится по формуле

$$E = E_0 \frac{F_2}{F_0^2},$$

где E_0 — экспозиция просвечивания при фокусном расстоянии F_0 , найденная по номограмме; E — необходимая экспозиция просвечивания при выбранном фокусном расстоянии F_2 .

При контроле с помощью изотопов материалов, отличающихся по плотности от материалов, для которых приводятся номограммы, время просвечивания определяется по эквивалентной толщине материала. Эквивалентную толщину материала определяют по приведенной формуле, справедливой при энергии квантов ~ 1 Мэв и более:

$$d_{\text{эkv}} = d_x \frac{\rho_x}{\rho},$$

где $d_{\text{эkv}}$ и ρ — эквивалентная толщина и плотность материала, для которого построена номограмма; d_x и ρ_x — толщина и плотность контролируемого изделия.

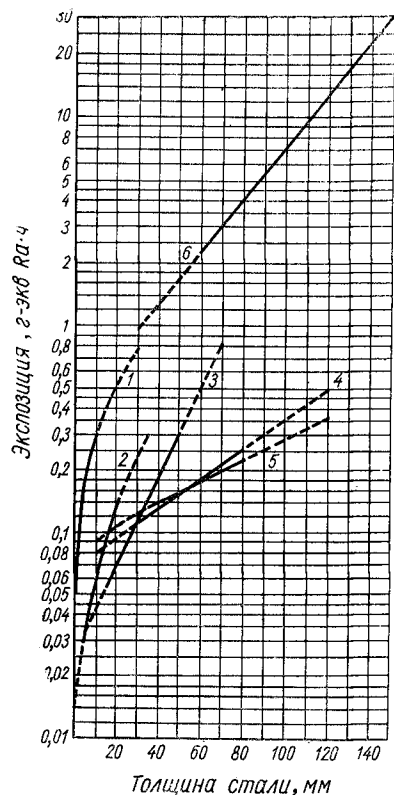


Рис. 42. Номограмма для определения экспозиций просвечивания сплавов на основе железа на пленку РТ-1 ($D=1,5$) γ -излучением радиоактивных изотопов:
 1 — ^{170}Tm , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,05/0,05 мм; 2 — ^{76}Se , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 3 — ^{192}Ir , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 4 — ^{137}Cs , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 5 — ^{152}Eu , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 6 — ^{60}Co , $F=85$ см, фольги свинцовые толщиной 0,2/0,2 мм.

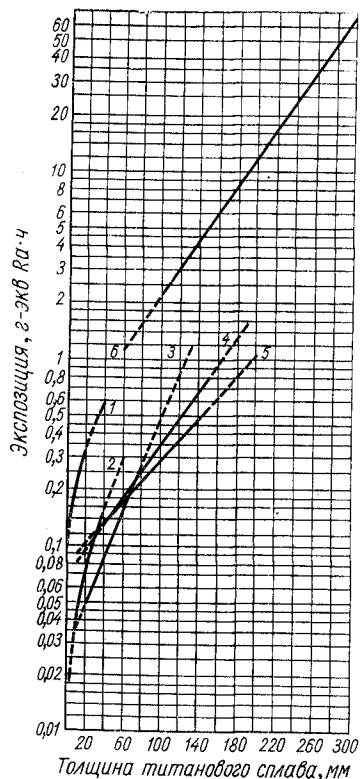


Рис. 43. Номограмма для определения экспозиций просвечивания титановых сплавов на пленку РТ-1 ($D=1,5$) γ -излучением радиоактивных изотопов:
 1 — ^{170}Tm , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,05/0,05 мм; 2 — ^{76}Se , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 3 — ^{192}Ir , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 4 — ^{137}Cs , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 5 — ^{152}Eu , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 6 — ^{60}Co , $F=85$ см, фольги свинцовые толщиной 0,2/0,2 мм.

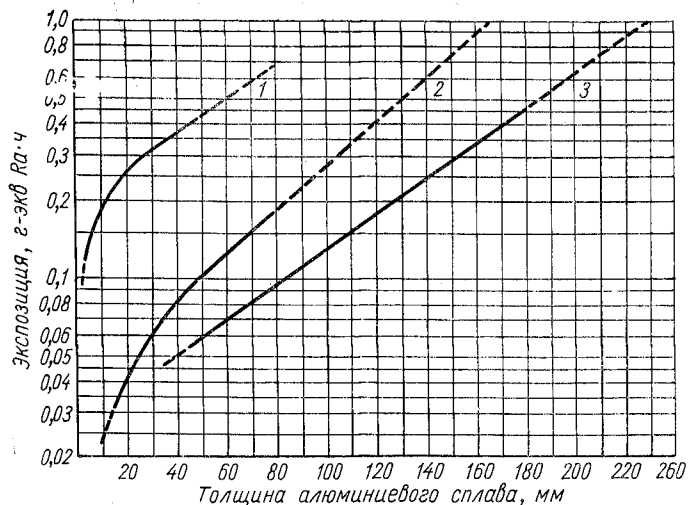


Рис. 44. Номограмма для определения экспозиций просвечивания алюминиевых сплавов на пленку РТ-1 ($D=1,5$) γ -излучением радиоактивных изотопов:
 1 — ^{170}Tm , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,05/0,05 мм; 2 — ^{76}Se , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 3 — ^{192}Ir , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм.

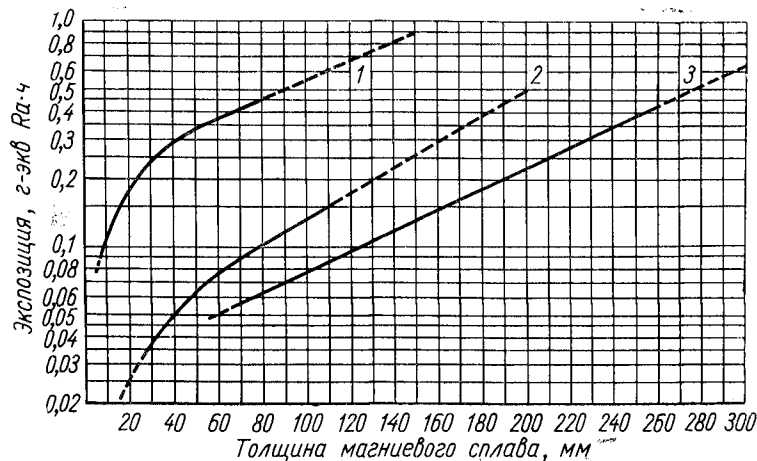


Рис. 45. Номограмма для определения экспозиций просвечивания магниевых сплавов на пленку РТ-1 ($D=1,5$) γ -излучением радиоактивных изотопов:
 1 — ^{170}Tm , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,05/0,05 мм; 2 — ^{76}Se , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм; 3 — ^{192}Ir , $F=50$ см, фольги свинцовые толщиной 0,1/0,2 мм.

Эквивалентную толщину стали для контролируемого материала можно найти, умножая толщину контролируемого изделия на соответствующий радиографический коэффициент эквивалентности (см. табл. 29).

§ 4. РАСШИФРОВКА РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Просмотр радиограмм. Перед расшифровкой радиограмму предварительно просматривают с целью определения ее качества. Расшифровке подлежат радиограммы, не имеющие на поверхности царапин и загрязнений, дефектов, обусловленных неправильной фотообработкой, и радиографических дефектов, обусловленных неправильным режимом просвечивания. Наличие царапин и загрязнений на поверхности пленки легко удаляется при рассмотрении ее в отраженном свете. Дефекты радиограмм, обусловленные неправильной фотообработкой, обнаруживаются при рассмотрении ее в проходящем свете. Причины появления и меры устранения этих дефектов описаны в гл. 4. Радиографические дефекты снимков определяются также при рассмотрении снимков в проходящем свете.

Радиографические дефекты снимков. Радиографические дефекты снимков возникают при неправильном режиме просвечивания, например ошибки в определении плотности материала, напряжения, экспозиций и др. Чтобы предотвратить появление радиографических дефектов при повторном просвечивании, необходимо знать причину их появления. Ниже описаны дефекты снимков, возникающие при неправильном режиме просвечивания, и меры по их устранению.

1. *Высокая оптическая плотность.* Высокая оптическая плотность может быть обусловлена либо слишком большой экспозицией, либо длительным проявлением. В первом случае при повторном просвечивании необходимо уменьшить экспозицию не менее чем на одну треть. Во втором — уменьшить время проявления.

2. *Низкая оптическая плотность.* Недостаточная оптическая плотность может быть обусловлена либо слишком малой экспозицией, либо малым временем проявления. При повторном просвечивании необходимо увеличить экспозицию не менее чем на 40% (или скорректировать время проявления).

3. *Высокая контрастность.* Чрезмерная контрастность снимка может быть обусловлена либо высокой радиографической контрастностью просвечиваемого объекта, либо высокой контрастностью пленки. При повторном просвечивании контрастность понижается с помощью повышения напряжения, применения фильтров и компенсаторов и пленок с меньшей контрастностью.

4. *Низкая контрастность.* Низкая контрастность снимка может быть вызвана низкой радиографической контрастностью просвечиваемого объекта, низкой контрастностью пленки (или недопроявлением). При повторном просвечивании контрастность повышается путем уменьшения напряжения на трубке или применением более контрастной пленки.

5. *Плохая четкость.* Плохая четкость снимка может быть обусловлена несоответствующей требованиям геометрией просвечивания, плохим контактом между пленкой и усиливающими фольгами и экранами, зернистостью пленок и экранов. При повторном просвечивании четкость снимка можно повысить за счет применения трубок с меньшим фокусным пятном (или источников с меньшим диаметром), увеличения фокусного расстояния, уменьшения расстояния объект — пленка и применения мелкозернистых пленок.

Радиографическая вуаль. Возникает вследствие воздействия на рентгеновскую пленку рассеянного излучения в процессе просвечивания. Для предотвращения появления радиографической вuali необходимо принимать специальные меры по борьбе с рассеянным излучением. Обратную сторону кассеты с пленкой защищают листовым свинцом или просвинцованной резиной. Применяют маски, фильтры и диафрагмы.

Расшифровка радиограмм. Расшифровка радиограмм должна производиться в условиях, обеспечивающих наилучшую выявляемость дефектов. С этой целью радиограмму помещают на матовое стекло негатоскопа. Помещение для расшифровки должно быть с ослабленным освещением, чтобы от поверхности пленки не было отражений.

При расшифровке необходимо правильно объяснить всю радиограмму. Поэтому расшифровщик должен иметь представление о процессах, происходящих при просвечивании, знать основы технологии изготовления

изделия и уметь распознавать дефекты, возникающие в различных технологических процессах, по их изображению на радиограмме. Помимо теоретических сведений при расшифровке радиограмм необходим практический опыт. Ниже приводится описание основных технологических дефектов, обнаруживаемых радиографическим методом контроля, рассматриваются причины их появления в процессе изготовления изделия и даются характеристики их изображений на радиограмме.

Внутренние дефекты сварки плавлением

Газовые включения (поры). В процессе сварки в зоне расплавленного металла может происходить выделение газа. Причины выделения газа обуславливаются

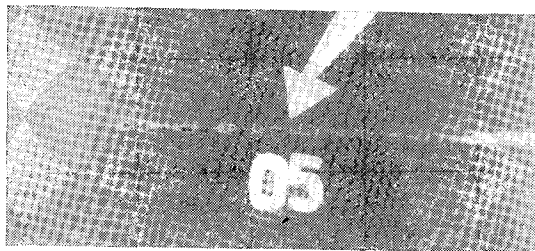


Рис. 46. Радиограмма сварного шва с цепочкой пор (сталь, $\delta=2$ мм; сварка электронным лучом).

качеством свариваемого металла, качеством применяемых электродов, режимом регулирования дуги и недостатками технологии сварки. Чрезмерное выделение газа приводит к тому, что он не успевает полностью выделиться из расплавленной зоны перед ее затвердеванием. Оставшиеся пузырьки газа образуют в наплавленном металле раковины, которые снижают механическую прочность соединения.

На радиограммах изображение газовых раковин имеет вид круглых темных пятен с резко очерченным контуром (рис. 46), иногда изображение газовых включений может иметь вытянутую форму, зависящую от ориентации этих включений относительно направления просвечивания. Удлиненные раковины, перпендикулярные поверхности шва, являются характерными при ав-

томатической сварке и могут образоваться в результате применения сырого флюса или неравномерного регулирования тока дуги. Газовые раковины могут появиться также при использовании мокрых электродов. Газовые включения классифицируются по числу пор на единицу длины шва и по их величине. Различают отдельные поры, группы пор и цепочки пор. Наибольшую опасность представляют цепочки пор.

Шлаковые включения. При дуговой сварке всегда образуется шлак, предохраняющий от окисления металл в расплавленной зоне и регулирующий скорость остывания металла. По разным причинам шлак может попасть в расплавленный металл, и если металл быстро твердеет, то шлак не успевает выйти из него. При многослойной сварке часть шлака, образовавшегося на предыдущем слое наплавленного металла и не удаленного при очистке, попадает под следующий слой металла и образует шлаковые включения. Такие включения шлака скапливаются по краям нижележащих слоев металла и могут растягиваться по длине шва. Шлаковые включения нарушают сплошность наплавленного металла и в некоторых случаях могут привести к недостаточному сплавлению основного и наплавленного металла. Прочность таких соединений резко уменьшается.

Так как шлаки в основном состоят из окислов, то плотность их значительно меньше, чем плотность основного металла. Поэтому на радиограмме изображения шлаковых включений образуют темные участки. Обычно изображения шлаковых включений имеют неправильную форму и нерезко очерченные границы. Плотность изображения может изменяться и местами приближаться к плотности основного металла. При многослойной сварке и нещательной очистке предыдущих слоев наплавленного металла часто встречаются шлаковые включения в виде сплошных или прерывистых линий, расположенных по краям шва. Если известен угол скола свариваемых кромок, то по расстоянию шлаковой линии от края шва можно приблизительно оценить глубину расположения шлака. Шлаковые включения, образующие линии, часто сопровождаются непроваром. Подобным же образом выявляется на радиограмме дефект, образующийся в результате неравномерной усадки металла в последующих слоях, вследствие чего образуются пустоты между слоями.

Непровар. При сваривании листов в стык открытая вершина шва остается внизу шва (при односторонней сварке со скосом двух кромок) или в центре шва (при двухсторонней сварке с двумя симметричными скосами обеих кромок). При сварке тонких листов их края, срезанные под прямым углом, соединяются так, чтобы оставалась открытая вершина шва. Назначение откры-



Рис. 47. Радиограмма сварного шва с дефектами (сталь, $\delta=4$ мм):
1 — непровар; 2 — поры; 3 — включение.

той вершины заключается в том, чтобы обеспечить доступ наплавляемого металла в самые глубокие участки канавки шва. Прихваточные швы, расположенные на определенном расстоянии друг от друга, предохраняют свариваемые детали от относительного смещения вследствие усадки наплавляемого металла. Затем шов заваривается одним или несколькими слоями наплавленного металла до полного заполнения канавки шва. Если зазор между листами слишком мал по сравнению с диаметром присадочного прутка или недостаточен ток дуги, наплавленный металл перед затвердеванием не успевает заполнить вершину шва и в нем остается непровар. При односторонней сварке непровар легко ликвидировать, если имеется доступ к обратной стороне шва. Причинами образования непровара могут быть плохой скос кромок и плохая подготовка канавки шва.

На радиограмме изображение непровара имеет вид темной непрерывной или прерывистой полосы, расположенной в центре изображения шва (рис. 47). На изображение непровара могут накладываться изображения шлаковых включений и газовых пор. Иногда изображение непровара может иметь вид двух параллельных, близко расположенных темных линий. Причина появления непровара в этом случае заключается в слишком большом промежутке между свариваемыми листами, в

результате чего получается неполное приваривание наплавляемого металла, проникающего в вершину шва, к основному металлу. При просвечивании швов в наклонном направлении и швов с несимметричным скосом кромок изображение непровара можно наблюдать не обязательно в центре изображений шва.

Трещина. Если технология сварки или свариваемый материал и материал электродов не соответствуют необходимым требованиям, то в сваренном шве могут возникнуть внутренние напряжения вследствие усадки металла при остывании. Внутренние напряжения бывают настолько велики, что вызывают разрушение наплавленного или основного металла, в результате чего образуются трещины (горячие, холодные и другие). Трещины могут располагаться параллельно или перпендикулярно оси шва. Трещины в наплавленном металле, перпендикулярные оси шва, могут распространяться и на основной металл. Иногда трещины возникают вдоль боковой стороны нагреваемой зоны. Трещины никогда не бывают прямыми, а имеют неправильную зигзагообразную форму. Часто от основных трещин отходят более тонкие трещины.



Рис. 48. Радиограмма сварного шва двух материалов (сплав из титана и сплав на основе меди — внизу, $\delta=1$ мм) с трещиной (правая часть шва).

Изображение трещины на радиограмме имеет вид темной узкой линии (рис. 48). Ширина этой линии зависит от ширины раскрытия трещины в направлении просвечивания. Лучше всего трещины выявляются по радиограммам тогда, когда направление трещины совпадает с направлением просвечивания, при этом изображение трещины очень резкое; в противном случае изображение будет затемнено. Иногда при вынимании пленки из конвертов и зарядке кассет возникают электрические разряды. При этом пленка частично засвечивается и при проявлении на ней образуются темные полосы и линии, которые при расшифровке могут быть приняты за изображение трещин. Во всех сомнительных случаях необходимо повторное просвечивание. Боль-

шинство мелких трещин не обнаруживается радиграфическим методом контроля даже при высоком качестве применяемых материалов и аппаратуры.

Непровар по скосам кромок. Если на поверхности скосов кромок свариваемых листов имеется окалина или при сварке не достигается необходимая температура, то наплавленный металл может не сплавиться с основным. Этот дефект имеет вид тонкой трещины, расположенной вдоль скоса кромки и часто бывает заполнен тонкой пленкой окисла, отделяющей основной металл от наплавленного. Для выявления такого непровара необходимо просвечивать шов в направлении скоса кромок.

Изображение непровара по скосу кромки на радиограмме имеет вид узкой прямой темной полоски, расположенной у края изображения шва и параллельной его оси.

Вольфрамовые включения. Вольфрамовые включения являются характерным дефектом аргоно-дуговой сварки. Так как температура плавления вольфрама высока, то при сварке не происходит плавления вольфрама. Однако при соприкосновении вольфрамового электрода с металлом шва частички вольфрама могут перейти в наплавленный металл. Образуются вольфрамовые включения, имеющие вид капелек и кусочков проволоки. Ионизирующее излучение ослабляется в вольфраме значительно сильнее, чем в железе или других материалах. Поэтому изображение вольфрамовых включений на радиограмме имеет вид светлых точек и пятен (см. рис. 47). Предполагается, что вольфрамовые включения увеличивают местную концентрацию напряжений в шве.

Наружные дефекты сварки плавлением

Большинство наружных дефектов сварки легко обнаруживается при непосредственном осмотре изделия. Однако для правильной расшифровки радиограмм необходимо уметь различать на них изображения наружных дефектов. В ряде случаев, как, например, при контроле труб без доступа изнутри или закрытых конструкций, наружные дефекты сварки могут быть обнаружены только радиграфическим методом контроля.

Неполное заполнение канавки шва. При большой скорости перемещения электрода или плохом распределении наплавленного металла часть канавки шва может остаться незаполненной. Недостаточное заполнение канавки шва может происходить по бокам скоса свариваемых кромок (плохое распределение наплавленного металла) или в центре шва (большая скорость перемещения электрода или недостаточная подача присадочного металла).

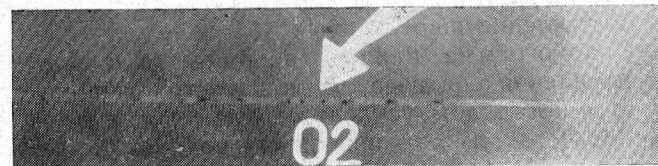


Рис. 49. Радиограмма сварного шва с утонением (сталь, $\delta=0,2$ мм, сварка электронным лучом).

На радиограмме изображение участка неполного заполнения канавки шва (утонения) оказывается более темным, чем изображение шва или основного металла (рис. 49).

Вогнутость в вершине шва. Вогнутая поверхность в вершине шва возникает при сварке труб (особенно без опорных колец) или при сварке потолочных швов вследствие опускания расплавленного металла верхней поверхности шва под действием силы тяжести. Вогнутость шва может возникнуть и при выполнении шва с опорной подкладкой в вершине канавки шва, если между расплавленным металлом и опорной подкладкой вплавляется шлак.

На радиограмме изображение вогнутости в вершине шва проявляется в виде темной полосы в центре изображения шва, ширина которой соответствует зазору между кромками при подготовке шва. Вогнутость шва нельзя считать непроваром, так как ее изображение шире и не имеет резких границ.

Избыточное усиление шва. Если шов выполняется с чрезмерным количеством проходов или с недостаточной дугой и скоростью перемещения электрода, усиление шва получается слишком высоким. На границе меж-

ду основным металлом и усилением образуется резкое изменение толщины.

На радиограмме изображение шва с избыточным усилением имеет пониженную оптическую плотность с резким изменением плотности на границе усиления с основным металлом.

Нахлест. Если при проходе последнего слоя шва образуется излишек наплавляемого металла (например, в результате чрезмерной скорости подачи присадочного металла), то избыточный металл может нахлестываться на основной. При этом может образоваться непровар по краю усиления шва.

На радиограмме нахлест проявляется в виде резкого изменения оптической плотности изображения основного металла и усиления. Край усиления в местах нахлеста имеет неровный волнистый контур. В местах образования нахлеста часто содержатся газопоры.

Пролав. Иногда наплавляемый металл протекает через вершину канавки шва и образует на обратной стороне шва излишнее усиление — пролав. Причины образования пролава могут заключаться в чрезмерном раскрытии вершины шва или слишком высокой температуре наплавляемого металла. Пролавы возникают в швах, выполняемых без опорных прокладок в вершине шва.

На радиограмме изображение пролава представляет собой линию пониженной оптической плотности в центре изображения шва. Ширина линии соответствует ширине зазора между свариваемыми кромками, а неравномерность ее плотности — неодинаковой толщине пролава. Иногда можно наблюдать отдельные круглые светлые пятна, расположенные в середине изображения шва. Такая картина соответствует пролаву в виде отдельных висящих капель наплавленного металла, которые часто содержат газовые поры.

Продольные и серповидные канавки. При выполнении горизонтальных многослойных швов поверхность последнего слоя редко бывает гладкой. На поверхности наплавленного металла появляются продольные канавки, параллельные кромкам шва. При автоматической или ручной сварке на поверхности шва образуются поперечные серповидные канавки. Серповидные канавки могут возникать вследствие неравномерного перемеще-

ния электродов, неравномерной подачи присадочного металла и колебаний тока дуги. Серповидные канавки, образующиеся при ручной сварке в местах, соответствующих смене электродов, часто сопровождаются шлаковыми включениями.

Как продольные, так и поперечные серповидные канавки образуют на поверхности шва волнообразное изменение толщины, и их изображение на радиограмме имеет вид чередующихся светлых и темных полос с неясными очертаниями, располагающихся параллельно изображению шва (продольные канавки) или поперек (серповидные канавки).

Подрезы. При наваривании последнего слоя может произойти оплавление верхних скошенных кромок шва. Если при этом подача присадочного металла недостаточна для заполнения всей канавки шва, то расплавленный основной металл стекает в канавку, а по краям шва образуются канавки-подрезы, отделяющие основной металл от усиления шва.

На радиограмме подрез имеет вид темной полосы, расположенной по краю изображения шва. Подрез может быть сплошным и прерывистым и образуется на одной или на обеих сторонах шва.

Прожог. В некоторых случаях вследствие ошибок при сварке может произойти местное проплавление основного металла. В этих местах образуется углубление — прожог.

На радиограмме изображение прожога имеет вид темного пятна, расположенного у края изображения шва.

Смещение кромок шва. При невнимательной подготовке шва или в процессе сварки может произойти смещение свариваемых элементов относительно оси канавки шва. При двусторонней сварке на радиограмме наблюдается смещение изображений обоих усиления от центральной оси шва. При одностороннем скосе кромок усиление, образующееся в вершине шва при ее подварке, значительно уже, чем усиление верхней стороны шва. В этом случае изображение усиления при вершине шва целиком размещается на изображении верхнего усиления и смещено к его краю.

Брызги от электрода, капли металла. Если при сварке применяются негодные электроды, то может произойти разбрызгивание капелек расплавленного ме-

талла, которые прилипают к поверхностям основного металла около шва. Разбрызгивание металла происходит также при включении дуги или при ее смещении в процессе сварки.

На радиограмме изображения капелек металла имеют вид круглых светлых точек и пятен, расположенных около изображения шва.

Дефекты точечной и роликовой сварки. Характерными дефектами точечной и роликовой сварки являются дефекты в виде трещин, пор, раковин и выплесков. На радиограммах эти дефекты распознают по тем же признакам, что и аналогичные им дефекты сварки плавлением. Непровары точечной и роликовой сварки выявляются плохо.

Дефекты паяных соединений. В паяных соединениях наиболее распространенными дефектами являются трещины, газовые поры и непропаи. На радиограммах дефекты пайки распознаются по тем же признакам, что и аналогичные им дефекты сварки.

Дефекты литых изделий

Газовые раковины. Наиболее часто газовые раковины образуются в отливках при литье в земляные формы. Появление газовых раковин может быть обусловлено турбулентностью, возникающей при разливке металла, поглощением газа самим металлом, а также выделением газа из сырых стержней и влажных земляных форм. Обычно газ, попавший в расплавленный металл, выделяется из него через поры в земляной форме или через отверстия литника и выпора. Однако если металл затвердеет до того, как выделится газ, то этот газ остается в отливке, в результате чего образуются газовые раковины и поры.

На радиограмме газовые раковины видны как темные, резко очерченные участки (рис. 50). Когда такие раковины заполняются шлаком, то их изображение становится менее темным, а контур менее резким.

Газовая пористость. Газовая пористость образуется включениями газа значительно меньшего размера, чем газовые раковины, и возникает по тем же причинам, что и раковины. Газовая пористость может возникнуть также вследствие выделения газа из расплавленного

металла или примесей при длительном поддержании высокой температуры.

На радиограмме изображение газовой пористости проявляется в виде мелких круглых темных точек (рис. 51).

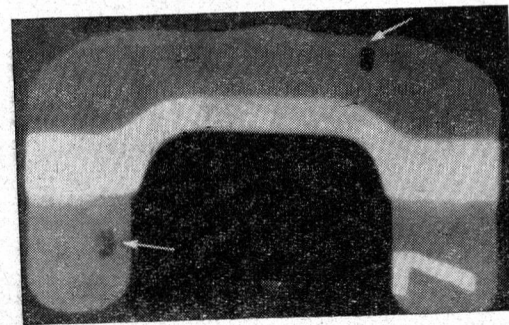


Рис. 50. Радиограмма магниевой отливки с раковинами.

Усадочные раковины. Усадочные раковины (рыхлоты) характерны для литых изделий с большим коэффициентом теплового расширения (алюминий, магний).

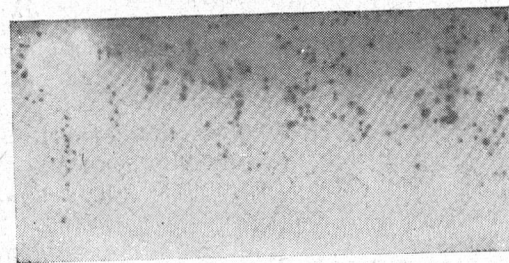


Рис. 51. Участок радиограммы алюминиевой отливки толщиной 10 мм с порами и раковинами.

Затвердевание металла в форме сопровождается уменьшением его объема. При таком сокращении объема отливки жидкий металл вытягивается из выпоров и литников. Однако если металл в выпорах и литниках

затвердеет раньше металла в форме, то для создания отливки с плотной однородной структурой металла окажется недостаточно и в результате образуются усадочные раковины. Обычно усадочные раковины образуются в местах утолщения отливки, остывающих наиболее медленно, в так называемых тепловых узлах отливки.

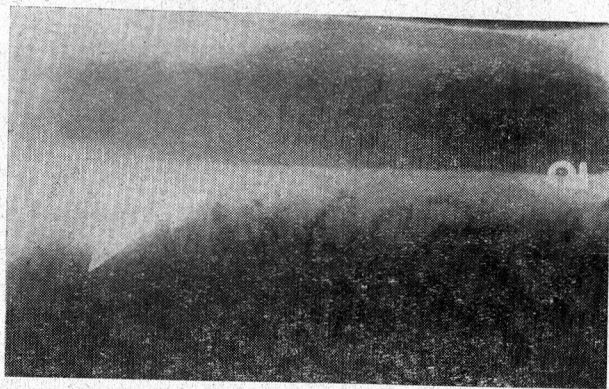


Рис. 52. Радиограмма литой детали с рыхлотами.

На радиограмме усадочные раковины (рыхлоты) имеют вид темных областей неправильной формы с нерезким контуром (рис. 52).

Усадочная пористость. Усадочная пористость возникает по тем же причинам, что и усадочные раковины, но значительно меньше по размерам.

На радиограмме усадочная пористость имеет вид темных пятен и точек, не имеющих четких очертаний.

Трещины. Трещины в отливках могут появиться по различным причинам. При неосторожном изъятии отливки из форм в них могут образоваться «холодные» трещины. Появлению трещин может способствовать неправильная конструкция отливки. Трещины возникают под действием внутренних напряжений или же в результате термической обработки («горячие» трещины). В некоторых случаях ограничение перемещения отливки в форме в процессе затвердевания может также привести к появлению «горячих» трещин. Наиболее вероятно появление трещин в местах резкого изменения толщины сечений отливки.

На радиограмме трещины имеют вид темных прерывистых или сплошных линий, часто неправильной формы. Наилучшая выявляемость трещин достигается в случае, если направление просвечивания совпадает с плоскостью трещины. Трещины являются наиболее опасным дефектом литых изделий.

Включения. В расплавленный металл, заливаемый в форму, могут попасть различные посторонние предметы (куски инородного металла, стружка, шлак и др.), образующие включения в отливке. На радиограммах включения имеют вид темных или светлых точек и участков, по форме соответствующих проекции включения. Если материал включения плотнее основного металла, то изображение включения будет светлее окружающего фона, а если основной металл плотнее включения — то изображение включения темнее.

Недоливы. При недостаточном количестве металла, заливаемого в форму, в отливке образуется недолив. Обычно недоливы обнаруживают при внешнем осмотре отливки. Однако в некоторых случаях недолив может иметь незначительные наружные размеры и при просвечивании выявляется их связь с внутренней раковиной. На радиограмме недоливы выделяются темным хорошо очерченным контуром.

Смещение стержня. При изготовлении литых изделий, имеющих предусмотренную пустоту, в форму вставляют специальные стержни по форме пустоты. В процессе заливки формы может произойти смещение стержня. Такой дефект легко выявляется на радиограмме по толщине стенок отливки.

Ликвация. В некоторых сплавах при затвердевании происходит разделение составляющих компонентов, в результате чего образуются участки с большей и меньшей плотностью — ликвация металла. На радиограмме ликвация металла обнаруживается в виде темных и светлых пятен, часто похожих на хлопья снега.

Неслитины. Неслитины образуются преимущественно в тонких сечениях отливки при движении расплавленного металла с двух сторон. Вследствие преждевременного твердения встречные потоки металла не успевают слиться. На радиограммах неслитины видны как темные, хорошо очерченные прерывистые или сплошные линии.

§ 5. СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАДИОГРАФИИ

В ряде случаев при контроле уникальных изделий и конструкций или в случае необходимости более точного определения величины дефекта, а также глубины его залегания в изделии могут применяться специальные методы радиографии [1, 10, 15].

Радиография с использованием тормозного излучения с высокой энергией квантов. Радиография с использованием тормозного излучения с энергией квантов свыше 1 Мэв является непосредственным развитием обычных методов радиографии при низкой и средней энергии квантов рентгеновского и γ -излучения. В качестве источников тормозного излучения высокой энергии можно использовать высоковольтные генераторы рентгеновского излучения, линейные ускорители электронов и бетатроны.

Наиболее широко в радиографии применяют бетатроны, так как их конструкция позволяет получить тормозное излучение с широким интервалом энергии квантов (от 1 до 30 Мэв и более).

Высокая четкость изображения, получаемая при использовании бетатронов в радиографии, обусловлена тремя факторами: сравнительно небольшим фокусным пятном — мишенью бетатрона, большими фокусными расстояниями (от 1 м и более) и малым коэффициентом рассеяния излучения высокой энергии. При зарядке кассет вместо фольг применяют свинцовые экраны (см. табл. 18). В случае применения флуоресцирующих экранов для повышения качества изображения между просвечиваемым предметом и кассетой размещают свинцовый фильтр.

При энергии излучения 1 Мэв рекомендуемая толщина фильтра равна 3—6 мм. С увеличением энергии излучения толщину фильтра следует увеличивать. В случае просвечивания излучением с энергией квантов 1—3 Мэв с обратной стороны кассеты для защиты пленки от рассеянного излучения устанавливают свинцовые экраны толщиной 6—15 мм. Необходимость защиты от рассеянного излучения с обратной стороны кассеты отпадает при использовании для просвечивания излучения с энергией квантов 10 Мэв и более вследствие уменьшения коэффициента рассеяния излучения в данной области энергий.

Применение. Радиографию с использованием бетатронов применяют в промышленности в тех случаях, когда обычные методы радиографии не позволяют получить качественное изображение контролируемого изделия или вообще неприменимы по экономическим причинам. Так, например, целесообразно просвечивать излучением высокой энергии небольшие сварные и литые изделия, изготовленные из материалов с большим коэффициентом рассеяния при низких и средних энергиях излучения. Рассеянное излучение ухудшает качество радиограмм, вследствие чего ухудшается выявляемость дефектов. Применение излучения с энергией квантов более 10 Мэв позволяет существенно ослабить влияние рассеянного излучения и тем самым повысить качество радиограмм и выявляемость дефектов.

Некоторые жаропрочные сплавы, в состав которых входят никель, кобальт и другие материалы, при твердении образуют ярко выраженную кристаллическую структуру. Отливки из этих сплавов содержат крупные зерна кристаллов, способствующие направленному рассеянию излучения. При просвечивании таких отливок излучением низкой и средней энергии на радиограмме образуются зернистые овальные крапинки, которые могут замаскировать изображение дефектов, например трещин. В этом случае также целесообразно применить излучение бетатрона.

Другой случай применения бетатронов в радиографии — контроль толстостенных изделий (500 мм стали) и материалов повышенной плотности (уран, вольфрам, свинец). Просвечивание таких изделий и материалов излучением низкой и средней энергии нецелесообразно, так как в этом случае необходимые экспозиции просвечивания слишком велики, вследствие чего производительность контроля становится низкой, а стоимость — высокой. Бетатроны можно использовать для выявления внутренней геометрии крупных механизмов и узлов.

Экспозиция. В радиографии с использованием бетатронов величину необходимой экспозиции просвечивания измеряют в радах и определяют по номограммам экспозиций в зависимости от толщины и плотности просвечиваемого изделия и энергии излучения. На рис. 53 приводится график экспозиций просвечивания стали при различных энергиях излучения. В соответствии с вели-

чиной экспозиции, определенной по номограмме, вычисляют необходимую мощность дозы излучения установки или бетатрона, фокусное расстояние и длительность просвечивания. Если просвечиваемый материал отличается от стали по плотности, то экспозицию можно определить по эквивалентной толщине стали.

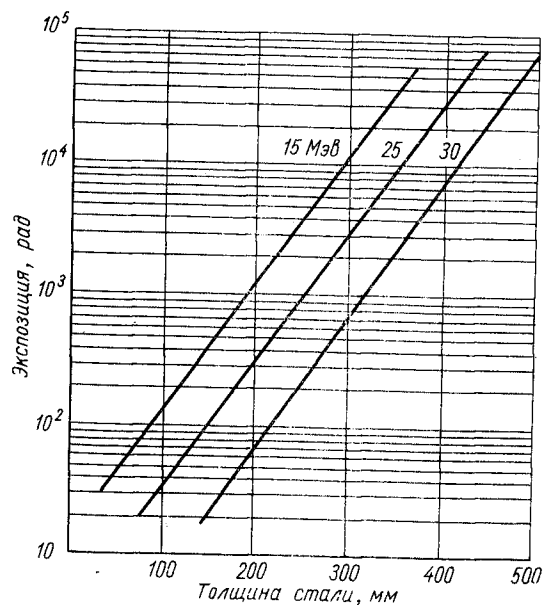


Рис. 53. Номограмма экспозиций просвечивания стали тормозным излучением бетатронов с энергией ускоряемых электронов 15, 25 и 30 Мэв.

Определение положения дефекта в изделии. В некоторых случаях нормы на допустимые дефекты предусматривают определенное положение дефекта в изделии. Так, например, дефекты, находящиеся в поверхностном слое отливки, могут считаться допустимыми, если при дальнейшей обработке отливки этот слой будет удален. В других изделиях, испытывающих большие нагрузки на поверхности, недопустимы дефекты, находящиеся близко у поверхности изделия, и могут допускаться глубоко залегающие дефекты. В этих случаях для оценки качества изделия возникает необходи-

мость измерения глубины залегания в нем дефекта. С этой целью можно применять метод двойного просвечивания со смещением источника излучения, схема которого изображена на рис. 54. На стороне контролируемого изделия, обращенной к пленке, делают метку *M* и изделие просвечивают из положения *1*. Затем источник излучения смещают на расстояние *l*, под контролируемое изделие подкладывают другую пленку и производят вторичное просвечивание из положения *2*. Если расстояние между контролируемым изделием и кассетой с пленкой много меньше фокусного расстояния, то смещением изображения метки *M* можно пренебречь. При расшифровке обе диаграммы накладывают одна на другую таким образом, чтобы совместились изображения метки *M*, а затем измеряют величину смещения изображения дефектов. Расстояние между дефектом и пленкой *a* находят по формуле

$$a = \frac{cF}{l+c},$$

где *c* — смещение изображения дефекта; *l* — смещение источника; *F* — фокусное расстояние.

Если пленка отстоит от контролируемого изделия на расстоянии *b*, то дефект расположен в изделии на глубине *a—b* от поверхности изделия, обращенной к пленке.

Если дефект хорошо обнаруживается на снимке, то просвечивание изделия из обоих положений можно производить на одну и ту же пленку, однако при таком

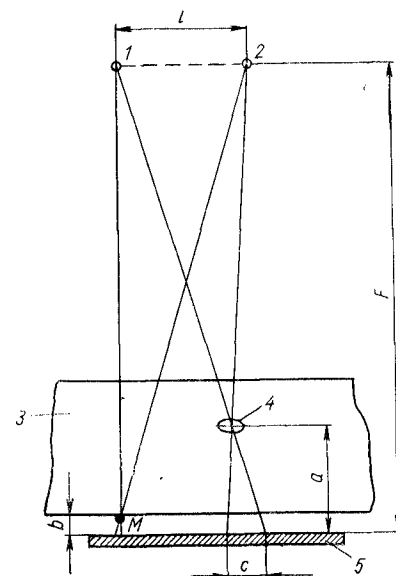


Рис. 54. Схема определения глубины залегания дефекта: 1 и 2 — положение источника при просвечивании; 3 — контролируемый объект; 4 — дефект; 5 — пленка.

двойном экспонировании ухудшается выявляемость других дефектов.

Стереорадиография. Если контролируемое изделие просвечивать из двух различных положений (положения 1 и 2, рис. 54) поочередно на две пленки, то возможно воссоздать объемную картину внутреннего строения изделия. С этой целью обе радиограммы вставляют в специальное устройство и рассматривают через стереоскоп. Данный метод контроля называется стереорадиографией. При просвечивании изделия фокусное расстояние F и расстояние между положениями источника излучения l определяют из условия оптимального стереоскопического видения. Стереорадиографический метод контроля позволяет непосредственно измерить глубину залегания дефекта в контролируемом изделии и установить его форму.

Определение размера дефекта в направлении просвечивания. В некоторых случаях возникает необходимость измерить размер дефекта в направлении просвечивания — глубину дефекта. С этой целью в радиографии применяют несколько методов [10], два из которых описаны ниже.

Первый метод. Глубину дефекта (чаще всего непровара) определяют с помощью эталонов. С этой целью рядом с контролируемым участком сварного шва устанавливают набор эталонов разной толщины и с различной глубиной канавок. Глубину непровара устанавливают по радиограмме путем визуального сравнения оптической плотности изображения канавок эталона с оптической плотностью изображения дефекта (непровара). Для оценки глубины непровара выбирают тот эталон, изображение которого имеет оптическую плотность, равную оптической плотности изображения сварного шва с усилением в местах непровара. При этом, если ширина канавок эталона примерно равна ширине непровара, то при равенстве оптических плотностей изображения непровара и одной из канавок глубина непровара равна глубине соответствующей канавки.

Второй метод. Глубину непровара определяют по результатам фотометрирования радиограммы. С этой целью измеряют оптическую плотность изображения непровара, изображения усиления шва и оптическую плотность фона рядом с изображением шва. Глубину

непровара d вычисляют по эмпирической формуле:

$$d = 10 + 15 \left(\frac{D_{\text{непр}} - D_{\text{усил}}}{D_{\text{фон}} - D_{\text{усил}}} \cdot h - 0,6 \right),$$

где $D_{\text{непр}}$ — оптическая плотность изображения непровара; $D_{\text{усил}}$ — оптическая плотность изображения усиления шва; $D_{\text{фон}}$ — оптическая плотность фона рядом с изображением шва; h — высота усиления шва, мм.

Глубину непровара определяют по данной формуле с точностью $\pm 20\%$.

Основы ксерорадиографии. Ксерорадиографический метод контроля отличается от радиографического использованием вместо рентгеновской пленки ксерорадиографической пластины, на которой регистрируется изображение участка просвечиваемого изделия. Получение ксерорадиографического изображения основано на использовании свойств фотопроводимости и электростатических явлений на поверхности заряженного полупроводника [21—23].

Явление фотопроводимости заключается в том, что некоторые диэлектрики под действием ионизирующего излучения становятся проводниками и хорошо проводят электрический заряд.

Ксерорадиографические пластины. Ксерорадиографическая пластина состоит из полированной проводящей подложки (из алюминия, латуни или стекла с проводящим слоем), на которую нанесен однородный слой аморфного селена. Толщина селенового слоя лежит в пределах от 50 до 200 мк. Слой селена является чувствительным элементом пластины, и от состояния его поверхности зависит качество изображения. Поверхность селена хорошо сопротивляется царапанью, отслаиванию и истиранию, однако очень чувствительна к малейшим изгибам пластины, вызывающим растрескивание селенового слоя.

Хранение. Ксерорадиографические пластины необходимо очищать и хранить в сухом месте в специальных закрытых ящиках с пазами. Пластины не должны подвергаться воздействию паров аммиака, тепла, сильного искусственного и солнечного освещения.

При температуре 24°С ксерорадиографические пластины сохраняются в течение 1,5 года. При нагревании

пластин выше 55°С аморфный селен переходит в кристаллическое состояние и становится непригодным для получения рентгеновского изображения.

Электрические повреждения. При зарядке ксерорадиографических пластин к тонкому чувствительному слою селена прикладывают напряжение порядка сотен вольт, в результате чего может возникнуть его пробой. В местах пробоя образуются дефекты в виде пор и уколов, которые дают на изображении круглые, не покрытые порошком пятна.

Усталость пластин. При низких напряжениях на рентгеновской трубке и коротких экспозициях ксерорадиографические пластины можно использовать повторно через несколько минут. При напряжениях выше 100 кВ, когда обычно применяются более длительные экспозиции, возможно появление эффекта усталости. Усталость проявляется в увеличении скорости разряда пластин при хранении их в темноте, в результате чего происходит уменьшение контрастности и чувствительности.

Для устранения усталости пластины ее подложку подвергают инфракрасному нагреву в специальной нагревательной камере до 55°С и выдерживают при этой температуре в течение 1 мин, после чего быстро охлаждают до комнатной температуры. При этом свойства пластины полностью восстанавливаются и ее можно немедленно использовать для дальнейшей работы.

Срок использования пластины. Ксерорадиографические пластины можно использовать многократно, так как при облучении их ионизирующим излучением заметных изменений в слое селена не происходит.

С каждой ксерорадиографической пластины можно получить до 600—1000 снимков. Практически пластины выходят из строя вследствие механических повреждений.

Зарядка ксерорадиографических пластин. Чтобы сделать ксерорадиографическую пластину чувствительной к ионизирующим излучениям, необходимо нанести на слой селена равномерный электрический заряд. Проводящая подложка во время процесса зарядки заземляется и приобретает заряд обратной полярности по сравнению с зарядом селенового слоя.

Зарядное устройство для зарядки ксерорадиографической пластины имеет светонепроницаемую камеру, в

которую помещают кассету с пластинкой, после чего крышку кассеты открывают. Во время зарядки над пластинкой перемещают каретку с натянутой на нее проволокой. Проволока находится под высоким потенциалом (5—10 кВ) относительно заземленной подложки, при этом между проволокой и подложкой возникает коронный разряд. Коронный разряд создает ионы, которые равномерно распределяются на поверхности селенового слоя, причем потенциал пластины может достигать 600 в. При этом напряженность электрического поля в тонком селеновом слое может достигать большой величины, поэтому для предотвращения электрического пробоя селена необходимо избегать чрезмерно высокого потенциала.

После зарядки пластину закрывают светонепроницаемой крышкой кассеты и защищают от воздействия света до тех пор, пока не закончится процесс проявления. Весь процесс зарядки пластины продолжается 10—15 сек.

Хранение заряженных ксерорадиографических пластин. Заряженная ксерорадиографическая пластина постепенно теряет свой заряд вследствие влияния естественных окружающих условий.

Ионы и электроны, находящиеся в воздухе, притягиваются к пластине под действием электрического поля и разряжают ее. Кроме того, сопротивление селенового слоя не бесконечно, а равно примерно 10^{15} ом/см (в отсутствие источников возбуждения), а потому поверхностный заряд частично стекает через слой селена к подложке.

Практически в отсутствие света и других источников излучения заряженные пластины можно хранить в течение часа и более без значительной потери чувствительности.

Тем не менее для уменьшения потери потенциала рекомендуется экспонировать и проявлять пластинку как можно скорее после ее зарядки. Чрезмерная продолжительность хранения заряженной пластины приводит к уменьшению ее чувствительности, однако чувствительность можно восстановить повторной перезарядкой пластины.

Как и при работе с рентгеновской пленкой, скрытое изображение на ксерорадиографической пластине исчезает под действием света или ионизирующих излу-

чений, поэтому пластину до проявления надо держать в светонепроницаемой кассете.

Аппаратура для ксерорадиографического контроля. В НИИ электрографии разработана установка для ксерорадиографического контроля типа «ЭРГА-С». Установка состоит из четырех камер, предназначенных для проведения следующих операций:

- 1) нанесения заряда на пластину и переноса изображения с пластины на бумагу;
- 2) просвечивают контролируемый объект;
- 3) закрепления изображения на бумаге;
- 4) механической очистки пластин.

Установка комплектуется 12 ксерорадиографическими пластинами размером 300×400, 300×240, 300×80 мм, проявляющим электрографическим порошком (3 кг) и комплектом меховых щеток для очистки селеновых пластин. Производительность контроля на этой установке примерно в 5 раз больше, чем производительность контроля с использованием рентгеновской пленки.

Методика ксерорадиографирования. При проведении ксерорадиографического контроля выполняют следующие операции:

- 1) заряжают ксерорадиографические пластины;
- 2) просвечивают контролируемый объект;
- 3) проявляют скрытое электростатическое изображение;
- 4) рассматривают и расшифровывают изображение;
- 5) фотографируют или переносят изображение на бумагу;
- 6) чистят пластину.

В общем методика просвечивания контролируемого объекта в ксерорадиографии аналогична методике просвечивания в радиографии, за исключением того, что вместо рентгеновской пленки для получения изображения просвечиваемого объекта применяют ксерорадиографическую пластинку. При укладке просвечиваемой детали на кассету с пластиной необходимо следить, чтобы крышка кассеты не прогибалась под тяжестью детали и не касалась чувствительного слоя пластины. В противном случае в месте касания заряд стекает и пластина теряет свою чувствительность. Точно так же нельзя прикасаться к пластине руками или любыми другими предметами.

Экспозиции. Величина экспозиции ксерорадиографических пластин в широком интервале энергии излучения меньше или равна соответствующим экспозициям рентгеновских пленок. При напряжениях на трубке от 30 до 200 кВ отношение экспозиции рентгеновской пленки к экспозиции ксерорадиографической пластины (при одинаковой толщине просвечиваемого материала и анодном напряжении) изменяется от 6 до 3 соответственно. При увеличении анодного напряжения до 1000 кВ и более экспозиции ксерорадиографической

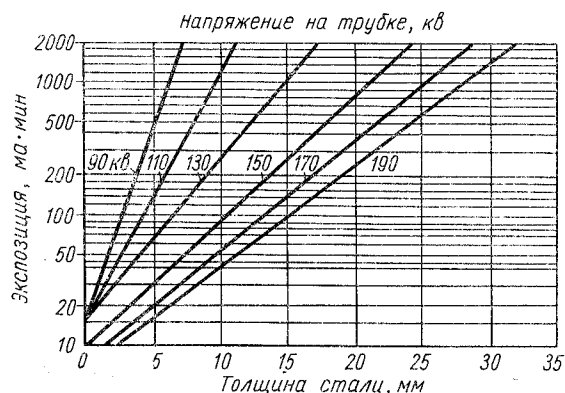


Рис. 55. Номограмма для определения экспозиций просвечивания стали на ксерорадиографическую пластину (толщина селенового слоя $\delta = 200 \text{ мк}$).

пластины и рентгеновской пленки становятся примерно равными. В области очень больших энергий излучения (10—20 МэВ), получаемых на бетатроне, экспозиции ксерорадиографических пластин становятся больше экспозиций рентгеновских пленок. Величина экспозиций при ксерорадиографировании в зависимости от фокусного расстояния, толщины и плотности просвечиваемого материала находится по номограммам экспозиций (рис. 55).

Борьба с рассеянным излучением. Повышенная чувствительность ксерорадиографических пластин в диапазоне малых энергий излучений (генерируемых при напряжении на трубке 20—50 кВ) требует особых мер для

борьбы с ухудшением изображения вследствие действия рассеянного излучения.

К числу таких мер относится применение следующих приспособлений:

- 1) фильтров перед источником излучения;
- 2) свинцовых экранов позади ксерорадиографических пластин для защиты их от обратно рассеянного излучения;
- 3) свинцовых фильтров между просвечиваемым объектом и ксерорадиографической пластинкой;
- 4) масок и диафрагм для ограничения излучения, которое проходит вне контуров просвечиваемого изделия.

Применение фольг и усиливающих экранов. Применять свинцовые фольги и флуоресцирующие экраны с ксерорадиографическими пластинами практически невозможно.

Для обеспечения максимальной резкости изображения фольги и экраны необходимо располагать в непосредственном контакте с чувствительным слоем пластины, а это приведет к стеканию заряда с пластины. Иногда при просвечивании пластину располагают таким образом, чтобы контролируемый объект лежал на подложке пластины, а ее чувствительный слой был обращен вниз. В этом случае перед нанесением селенового слоя подложку можно покрыть слоем тяжелого металла, который при просвечивании будет играть роль усиливающего экрана.

Выбор напряжения. Так же как и в радиографии, выбор напряжения при ксерорадиографировании определяется плотностью и толщиной контролируемого материала и величиной допустимых экспозиций.

Чувствительность. Чувствительность ксерорадиографирования примерно равна радиографической чувствительности. При просвечивании легких материалов при низких напряжениях на рентгеновской трубке достигается чувствительность порядка 1%, а разрешающая способность — 2%. При просвечивании более плотных и толстых материалов при высоких напряжениях чувствительность ухудшается до 2%, а разрешающая способность — до 4%.

Местная контрастная чувствительность. В ксерорадиографии встречается резкое увеличение контраста у границ изображения, которого нет в радиографии.

Это увеличение контраста проявляется в том, что границы изображения на пластине всегда получают резкими, даже в том случае, если различие в плотности порошкового изображения в смежных областях настолько мало, что с трудом поддается измерению. Этот эффект, возможно, обусловлен интерференцией электрических полей, образующих скрытое электростатическое изображение на ксерорадиографической пластине. Когда разряженный участок пластины оказывается смежным с участком, имеющим высокий потенциал, то электрическое поле ориентируется вдоль кратчайших путей от сохранившихся остаточных зарядов к смежным незаряженным участкам. В результате получается увеличенное по сравнению со средним отложение порошка на заряженной стороне границы изображения и уменьшенное отложение порошка на смежной незаряженной стороне границы. Увеличение контраста на границе изображения улучшает различаемость дефектов на ксерорадиограмме. Однако если контролируемый объект имеет резкие перепады толщин, то дефекты, залегающие в тонких местах и прилегающие к толстым сечениям, не могут быть обнаружены на ксерорадиограмме, так как их изображение оказывается в местах пластины, свободных от порошка.

Ксерорадиографическое подсвечивание. При ксерорадиографировании происходит два типа подсвечивания пластины. Первый тип — подсвечивание рассеянным излучением происходит так же, как и в радиографии, и его влияние можно уменьшить, применив специальные меры защиты от рассеянного излучения.

Второй тип подсвечивания наблюдается только при ксерорадиографировании и происходит вследствие ионизации воздуха в промежутке между крышкой кассеты и пластиной. Отрицательные ионы, образующиеся в воздухе под действием ионизирующих излучений, притягиваются к положительно заряженным местам пластины и частично нейтрализуют остаточный заряд, понижая контрастность изображения.

Для устранения этого эффекта между крышкой кассеты и металлической подложкой пластины необходимо создать высокую разность потенциалов, примерно равную потенциалу пластины. Полярность потенциалов должна быть такой, чтобы отрицательные ионы собирались не на пластине, а на крышке кассеты.

Проявление. Скрытое электростатическое изображение на ксерорадиографической пластине становится видимым после проявления. Для проявления ксерорадиографическую пластину помещают в специальную светонепроницаемую камеру так, чтобы селеновый слой был обращен вниз. Через специальное отверстие — сопло в камере распыляется проявляющий порошок. В сопле частички порошка электризуются, причем полярность заряда выбирается в зависимости от того, какое изображение необходимо получить — негативное или позитивное: для получения позитивного изображения полярность заряда порошка должна быть обратна полярности заряда пластины.

В процессе проявления на поверхность пластины осаждается порошок, количество которого пропорционально величине остаточного заряда пластины. При правильных режимах просвечивания и проявления ксерорадиографическое изображение получается резким и контрастным. Процесс проявления продолжается несколько секунд, после чего приступают к просмотру и расшифровке полученного изображения.

Проявляющий порошок. Для проявления изображения на пластине применяют цветные порошки. Порошок белого цвета обеспечивает высокий контраст изображения на темном фоне селенового слоя. Если необходимо перенести изображение с пластины на бумагу, применяют темные порошки. Для получения качественного изображения проявляющий порошок должен иметь возможно меньший размер частиц. Наилучшие результаты получают при использовании специальных проявляющих порошков для ксерорадиографии и электрографии № 5 с диаметром частиц от 5 до 40 мкм и № 5-У с диаметром частиц от 5 до 15 мкм.

Перенос изображения. Для получения ксерорадиографического изображения, годного к хранению, можно сфотографировать изображение на пластине или перенести его на бумагу. Для переноса изображения пластину помещают на каретку камеры для зарядки изображением вверх и накрывают листом бумаги. Бумага плотно прижимается к пластине прижимным валиком, и большая часть порошка переходит с пластины на бумагу, образуя на ней изображение.

Возможен также электростатический способ переноса изображения, при котором бумаге сообщается

электрический заряд и она притягивает частички порошка с пластины.

Закрепление изображения. Чтобы получить прочный отпечаток, изображение на бумаге необходимо закрепить. Закрепление изображения осуществляется в парах растворителей (например, ацетона). При таком способе закрепления происходит увеличение плотности потемнения изображения, и частицы порошка прочно закрепляются на бумаге. Так как пары растворителей ядовиты, фиксирование должно производиться в специальной герметической камере.

Чистка пластины. После фотографирования или переноса изображения на бумагу пластину очищают от порошка. Для этого ее пропускают над мягкой цилиндрической щеткой, приводимой во вращение мотором. После удаления с пластины оставшегося порошка она готова к повторному употреблению. При осторожном обращении и чистке ксерорадиографическая пластина может выдержать сотни и даже тысячи последовательных операций.

Расшифровка ксерорадиограмм. Расшифровка ксерорадиографического изображения осуществляется, так же как и при радиографировании. Качество ксерорадиограмм считают удовлетворительным, если получено четкое изображение соответствующих эталонов чувствительности. Эталоны необходимо располагать не только в центре, но и на краях пластины, где наиболее вероятно возникновение подсвечивания.

Основная трудность, возникающая при расшифровке изображения, заключается в том, что на пластине появляются пятна, на которых отсутствует порошок. Такие пятна можно спутать с дефектами или с отверстиями эталона. Появление пятен свидетельствует о том, что пластина пришла в негодность и ее необходимо заменить.

Преимущества ксерорадиографии. Ксерорадиография обладает рядом преимуществ по сравнению с радиографией:

- 1) не нужны затемненные фотолаборатории;
- 2) время получения готового отпечатка (не считая времени экспозиции) не превышает 2—3 мин;
- 3) многократное использование пластины;
- 4) большая разрешающая способность;
- 5) малый расход химических реактивов.

Недостатки ксерорадиографии. Наряду с достоинствами метод имеет существенные недостатки:

- 1) сложная технология изготовления пластин;
- 2) несовершенство аппаратуры;
- 3) слабая механическая прочность чувствительного слоя;
- 4) уменьшение контрастности с увеличением энергии излучения;
- 5) жесткие кассеты.

ВИЗУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ [ФЛУОРОСКОПИЯ]¹

Основы флуороскопии. Схема флуороскопического метода контроля показана на рис. 56. Метод основан на визуальном наблюдении флуороскопического изоб-

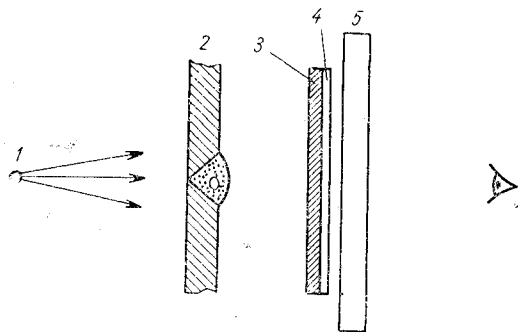


Рис. 56. Схема флуороскопического метода контроля:

1 — источник излучения; 2 — контролируемый предмет; 3 — подложка флуороскопического экрана; 4 — флуоресцирующий слой экрана; 5 — защитное окно.

ражения контролируемого предмета. Для получения флуороскопического изображения контролируемый объект просвечивают рентгеновским (или γ -излучением) на флуоресцирующий экран, который преобразует рентгеновское изображение предмета в видимое (флуороскопическое) изображение. Рентгеновская аппаратура, контролируемые изделия и расположение отдельных эле-

¹ В последнее время в литературе часто встречается термин «интроскопия».

ментов схемы такие же, как и в радиографии. Для усиления яркости флуороскопического изображения применяют электролюминесцентные экраны и электронно-оптические преобразователи, а для передачи изображения на расстояние — промышленные телевизионные установки [1, 10, 23, 24].

Чувствительность флуороскопии. Определение флуороскопической чувствительности аналогично определению радиографической чувствительности. Контрастная чувствительность определяет минимальный размер дефекта в направлении просвечивания (глубину дефекта), различимого на экране. Контрастная чувствительность зависит от свойств экрана, особенностей зрения, от радиографической контрастности просвечиваемого объекта и равна:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta B}{\mu d B} \approx \frac{0,016}{\mu d B^{0,38}},$$

где Δd — размер минимального дефекта в направлении просвечивания (глубина дефекта), различимого на экране; d — толщина просвечиваемого материала; μ — линейный коэффициент ослабления излучения в контролируемом материале; B — яркость свечения экрана; $\frac{\Delta B}{B}$ — яркостная контрастность — относительное изменение яркости свечения экрана, вызванное изменением толщины поглотителя Δd .

Это уравнение получено без учета действия рассеянного излучения. При вычислении оно дает величину большую, чем соответствующее ему уравнение для контрастной чувствительности радиографии, т. е. флуороскопическая контрастная чувствительность хуже радиографической.

Геометрическая чувствительность флуороскопии (разрешающая способность) определяет минимальный размер дефекта в направлении, перпендикулярном просвечиванию (ширину дефекта), различимого на экране и зависит от общей нерезкости флуороскопического изображения. Таким образом, минимальный размер дефекта Δx (его ширина), который можно рассмотреть на экране, умноженный на коэффициент увеличения V , должен быть равен или больше, чем общая нерезкость изображения U :

$$V \Delta x \geq U.$$

Минимальную ширину дефекта для конкретной схемы просвечивания можно оценить по уравнению:

$$\Delta x = \frac{1}{V} [\Phi^2 (V-1)^2 + U_b^2]^{\frac{1}{2}},$$

где V — коэффициент увеличения, $V=1+\frac{a}{b}$; a — расстояние источник — предмет; b — расстояние предмет — экран; Φ — размер фокусного пятна; $\Phi(V-1)$ — геометрическая нерезкость изображения; U_b — внутренняя нерезкость экрана.

Контрастная и геометрическая чувствительность определяют различимость дефектов на экране. Главными препятствиями достижения высокой чувствительности флуороскопии являются зернистость и недостаточная яркость свечения флуороскопических экранов.

Флуороскопические экраны. Флуороскопический экран состоит из картонной основы, на которую нанесен слой флуоресцирующего вещества — люминофора, смешанного с соответствующей связкой. Наиболее широко применяют цинк-кадмий-сульфидный люминофор, активированный серебром. Рентгеновское излучение падает на экран со стороны основы, а наблюдение ведется со стороны светящегося слоя. Свойства флуороскопических экранов зависят от многих параметров: толщины экрана, размера кристаллов люминофора, химического состава, чувствительности к излучению и др.

Все флуороскопические экраны выпускаются Московским химико-фармацевтическим заводом им. Н. А. Семашко.

Яркость свечения экранов. От яркости свечения экрана зависит флуороскопическая чувствительность, причем с увеличением яркости чувствительность повышается. Яркость свечения экрана в свою очередь зависит от характеристик экрана, в частности от чувствительности люминофора к излучению и от размера кристаллов люминофора. Чем крупнее кристаллы люминофора и чем больше интенсивность ионизирующего излучения, падающего на экран, тем выше яркость свечения экрана. Особый интерес представляет зависимость относительной яркости свечения экрана от энергии рентгеновского излучения при постоянной интенсивности излучения (рис. 57). Принято характеризовать относительную яр-

кость свечения экрана в зависимости от эффективного напряжений на трубке. Под эффективным напряжением понимают такое напряжение на трубке, которому соответствует условное моноэнергетическое излучение, ослабляемое в равной степени, как и данное немоноэнергетическое излучение (в одном и том же поглотителе).

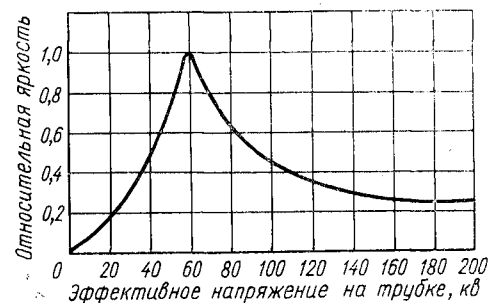


Рис. 57. Зависимость яркости свечения флуороскопического экрана от эффективного напряжения на рентгеновской трубке (от энергии излучения).

Это позволяет рассматривать немоноэнергетическое излучение как моноэнергетическое, возникающее при некотором эффективном напряжении. Практически эффективное напряжение на трубке примерно в два раза меньше максимального напряжения. Максимальная яркость свечения флуороскопических экранов достигается при эффективном напряжении на трубке 60 кВ (что соответствует максимальному напряжению 120 кВ).

Нерезкость экранов. Нерезкость экрана определяет ширину границы между двумя смежными участками экрана с различной яркостью свечения и измеряется микрофотометром. Нерезкость флуороскопических экранов зависит от размера кристаллов люминофора и составляет примерно 0,5—1,0 мм.

Спектральный состав свечения. При высокой яркости свечения максимальная чувствительность глаза человека лежит в желтой области спектра (длина волны $\lambda=5500 \text{ \AA}$). При низкой яркости чувствительность глаза смещается к зеленой области спектра ($\lambda=5000 \text{ \AA}$). Свечение флуороскопических экранов зеленого или желто-зеленого цвета с максимумом интенсивности при

$\lambda = 5300 \text{ \AA}$. Послеосвещение люминофора должно быть по возможности минимальным.

Защитные окна. При наблюдении флуороскопических изображений необходимо принимать специальные меры защиты от ионизирующих излучений. С этой целью можно применить зеркала, защитные окна и телевизионные установки. Применение зеркал, через которые рассматривается изображение на экране, приводит к потере яркости и ухудшает флуороскопическую чувствительность. Гораздо лучшие результаты получаются при использовании защитных окон, позволяющих наблюдать изображение непосредственно с экрана. Защитные окна должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) хорошо ослаблять ионизирующие излучения (примерно в 10^6 раз);
- 2) обладать высокой прозрачностью;
- 3) иметь небольшой коэффициент рассеяния излучения.

Наиболее подходящим материалом для защитных окон является стекло, содержащее тяжелые элементы — свинец, барий.

Интервал напряжений. Выбор напряжения на трубке (или радиоактивных источников излучения) зависит от типа рентгеновского аппарата или другого источника излучения, системы флуороскопа и от толщины и плотности материала исследуемых деталей. Практически напряжение следует выбирать таким образом, чтобы толщина просвечиваемой детали составляла пять слоев половинного ослабления. В табл. 30 приводятся оптимальные напряжения на рентгеновской трубке, рекомендуемые при просвечивании материалов различной толщины и плотности. В прямых методах флуороскопии для контроля узлов и литья из легких сплавов применяют напряжение от 30 до 150 кВ. В методах с применением телевизионных установок можно повышать напряжение до 2000 кВ.

Наблюдение флуороскопических изображений. По условиям рассматривания изображения флуороскопия является менее надежным методом контроля, чем радиография, так как количество информации, получаемое при рассматривании флуороскопического изображения, зависит от различных физиологических факторов.

Таблица 30

Оптимальные напряжения на рентгеновской трубке при просвечивании материалов различной толщины

Оптимальные напряжения на трубке, кВ	Толщина просвечиваемых материалов, мм		
	Сплавы на основе		
	магния	алюминия	железа
50	50	30	5
100	110	70	12
150	140	90	20
200	160	100	26
250	170	110	32
300	180	120	38
400	200	140	44
1000	300	200	74
2000	500	300	100

Минимальный различимый контраст яркости на экране, определяющий флуороскопическую чувствительность, зависит от яркости свечения экрана, степени адаптации глаза к темноте, продолжительности возбуждения и угла зрения. Обычно принято считать, что отношение минимального различимого контраста яркости ΔB , яркости экрана B равно

$$\frac{\Delta B}{B} \approx 0,016B^{-0,38}$$

Перемещение объекта. При одинаковой контрастности изображения зрительное раздражение от движущегося предмета больше, чем от неподвижного. Однако при больших скоростях перемещения контролируемого объекта может наблюдаться эффект мерцания и глаз не успевает различать мелкие детали изображения. Эффект мерцания обусловлен тем, что изображение на экране за время между двумя импульсами высокого напряжения на трубке перемещается на значительное расстояние и воспринимается глазом в виде отдельных картин. При малых скоростях контролируемого объекта перемещения изображения на экране между двумя импульсами напряжения не велики и мерцание не наблюдается, так как величина нерезкости оказывается достаточной, чтобы затемнить мерцание. Практически установлено, что максимальная скорость перемещения

объекта не должна превышать 3 м/мин. Такая скорость перемещения объекта при оптимальном увеличении его изображения позволяет обнаружить дефекты размером не менее 0,5 мм.

Острота зрения. Острота зрения определяется по способности глаза различать две близлежащие точки и зависит от индивидуальных особенностей наблюдателя. Практически можно считать, что наименьший угол зрения при обычной яркости флуороскопических экранов равняется 0,7'. При таком угле зрения, рассматривая изображение с расстояния 150 мм от экрана, можно различить дефекты шириной 0,15 мм.

Темновая адаптация глаза. Чувствительность зрения зависит от освещенности. При уменьшении освещенности в течение некоторого времени происходит восстановление нормальной чувствительности зрения. Этот процесс восстановления чувствительности зрения называется темновой адаптацией глаза. При переходе от дневного освещения в затемненное помещение требуется около одной минуты на адаптацию глаза, чтобы различить контраст яркости в 1% при уровне яркости флуороскопических экранов.

Флуктуации. Процессы образования и поглощения ионизирующих излучений являются статистическими. Статистические флуктуации, возникающие на различных этапах флуороскопии, приводят к тому, что яркость экрана в любой точке непрерывно изменяется около средней величины. Флуктуация яркости экрана может достигать 0,2% и затрудняет рассматривание флуороскопического изображения, в результате чего флуороскопическая чувствительность ухудшается.

Оптические системы. Если разрешающая способность флуороскопического экрана выше остроты зрения, то целесообразно применять вспомогательную оптическую систему для рассматривания изображения, например лупу. Выигрыша в яркости при этом не происходит, однако действительный угол зрения увеличивается. Для фотографирования изображения с экрана удобно иметь полужакрепленную фотокамеру.

Размеры флуороскопических экранов. Промышленностью выпускаются флуороскопические экраны размером 400×400, 356×356, 300×400, 240×300, 180×240 мм. В практике флуороскопии для улучшения условий рассматривания изображения целесообразно ог-

раничивать видимую часть экрана квадратной диафрагмой из картона до размеров 150×150 мм. Небольшое видимое поле экрана требует от наблюдателя меньшего напряжения, чем при наблюдении за всем экраном. Кроме того, необходимо избегать участков экрана, не заслоненных контролируемым объектом, так как их яркость значительно превосходит яркость изображения, в результате чего восприятие изображения ухудшается.

Флуороскопическое увеличение. Так как нерезкость флуороскопических экранов равна 0,5—1,0 мм, то для обнаружения возможно меньших дефектов целесообразно использовать флуороскопическое увеличение изображения. Практически коэффициент флуороскопического увеличения ограничивается допустимым расстоянием между анодом и экраном (фокусным расстоянием) и размерами контролируемого объекта и не превышает 2. Такое увеличение позволяет контролировать изделия с размером в направлении просвечивания до 230 мм при фокусном расстоянии 46 см. Допустимый коэффициент увеличения зависит также от размеров фокусного пятна. В табл. 31 приводятся допустимые коэффициенты увеличения и получаемое при этом улучшение относительной чувствительности в зависимости от величины фокусного пятна при собственной нерезкости экрана, равной 1,0 мм.

Расшифровка флуороскопических изображений. Расшифровка флуороскопических изображений отличается от процесса расшифровки радиограмм. Основное разли-

Таблица 31
Допустимые коэффициенты увеличения и улучшение относительной чувствительности в зависимости от величины фокусного пятна

Размер фокусного пятна, мм	Допустимый коэффициент увеличения	Улучшение относительной чувствительности*
0,4	3,5	2,3
1,0	2,0	1,6
2,0	1,5	1,3
3,0	1,3	1,2
5,0	1,2	1,1

* Улучшение относительной чувствительности равно отношению чувствительности, полученной с увеличением, к чувствительности, получаемой без увеличения.

чие состоит в том, что флуороскопическое изображение представляет позитив изображения, в то время как радиограмма является прозрачным негативом. В общем, выявление дефектов методом флуороскопии не представляет трудностей. Часто встречающиеся дефекты (усадочные раковины, трещины, поры, включения и др.) легко распознать по их характерным изображениям.

1. Газовые раковины. Газовые раковины выявляются на флуороскопическом экране как светлые, ровно очерченные участки. Когда раковины заполнены включением (шлаком или другим материалом), они становятся менее светлыми и их контур принимает неправильную форму. В алюминиевых отливках можно обнаружить газовые раковины, диаметр которых составляет примерно 8% толщины отливки в месте залегания дефекта, но не менее 1,5 мм.

2. Усадочные раковины. Усадочные раковины наблюдаются на экране как светлые участки с неровными очертаниями. Величину и истинное положение этих раковин легко установить, если отливку вращать. Наиболее успешно обнаруживают раковины с диаметром не менее 2 мм или составляющие 10% толщины той части отливки, где они образуются.

3. Включения. Включения выявляются на флуороскопическом экране в виде темных или светлых участков или точек. Когда включение тяжелее или плотнее основного металла, его изображение на экране темнее окружающего фона, и наоборот. Для успешного выявления включений необходимо, чтобы плотные включения были примерно на 20% тяжелее, а легкие включения — примерно на 30% легче основного металла.

4. Неслитины. При движении металла в тонких участках литейной формы с двух сторон возможно преждевременное остывание металла, в результате чего образуются неслитины, т. е. несплавление металла. На экране неслитины имеют вид светлых полос или овалов.

5. Трещины. Изображение трещин на экране имеет вид светлых протяженных участков. Успешно выявляются трещины, имеющие минимальную ширину, равную линейным размерам указанных выше дефектов. Многие трещины не имеют такой минимальной ширины и бывают неправильной формы. Поэтому методом флуороскопии их обнаружить труднее, чем методом радиографии.

Определение размеров дефектов. Определение размеров дефектов, выявляемых методом флуороскопии, осуществляется путем сравнения их с известными дефектами. Для этой цели применяют специальные флуороскопические эталоны чувствительности с искусственными дефектами (обычно отверстиями различного диаметра и различной глубины) или эталонные детали с известными дефектами.

Флуорография. Флуороскопическое изображение на экране можно фотографировать на обычную фотопленку. При фотографировании изображения происходит небольшое увеличение его контрастности, вследствие чего возможно небольшое увеличение чувствительности. Применение мелкозернистых пленок и светосильной оптической системы позволяет производить съемку на пленки небольшого формата. Флуорографирование материалов и изделий возможно при повышенных напряжениях на трубке (до 250 кВ и более), что существенно расширяет диапазон просвечиваемых толщин по сравнению с флуороскопией.

Электронная флуороскопия. Основным недостатком флуороскопии является малая яркость флуороскопического изображения.

Увеличение яркости изображения дает следующие преимущества:

- 1) повышение остроты зрения;
- 2) уменьшение времени, необходимого для адаптации глаза к темноте;
- 3) повышение контрастности изображения за счет применения более низкого напряжения на рентгеновской трубке.

Для увеличения яркости экранов применяют более мощные рентгеновские трубки или электронное усиление яркости.

Электролюминесцентные экраны. Электролюминесцентный экран представляет собой слой фотопроводника, покрытый люминофором. К слою фотопроводника прикладывают электрическое поле. Под действием рентгеновского или γ -излучения в фотопроводнике происходит возрастание электрического поля, пропорциональное интенсивности излучения. Это возрастание электрического поля вызывает увеличение свечения люминофора. Яркость свечения электролюминесцентных экранов превосходит яркость обычных экранов в 30—100 раз при

прочих равных условиях просвечивания. Кроме того, электролюминесцентные экраны позволяют получить более высокую чувствительность по сравнению с обычными экранами.

Электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Электронно-оптический преобразователь представляет

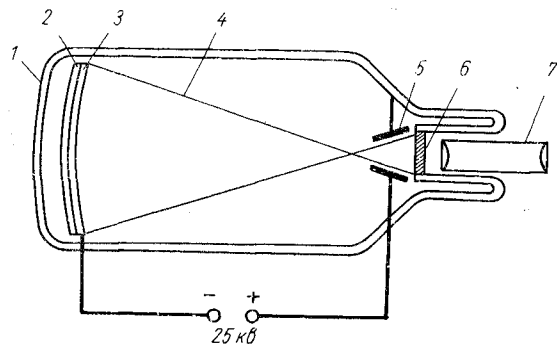


Рис. 58. Схема электронно-оптического преобразователя:

1 — стеклянный баллон; 2 — флуоресцирующий (входной) экран; 3 — фотокатод; 4 — траектория фотоэлектронов; 5 — анод; 6 — выходной экран; 7 — оптическая система для наблюдения изображения.

собой вакуумную трубку, в которую впаяны флуоресцирующий экран, чувствительный к свету фотокатод и управляющие электроды (рис. 58). При просвечивании контролируемого объекта на флуоресцирующий экран (входной экран) электронно-оптического преобразователя на нем возникает световое изображение объекта. Кванты видимого света с экрана попадают на фотокатод и вырывают из него фотоэлектроны, число которых пропорционально количеству световых квантов, попадающих в данную точку фото катода, т. е. пропорционально яркости свечения флуоресцирующего экрана в этой точке. Таким образом, в вакуумной трубке образуется электронный поток, несущий информацию о контролируемом объекте. Электронный поток ускоряется и фокусируется с помощью электрического поля анода и попадает на выходной экран ЭОП, вызывая его свечение. Яркость свечения выходного экрана во много раз (100—1000) превосходит яркость свечения входного экрана.

Усиление яркости достигается как за счет ускорения электронов в электрическом поле, так и за счет уменьшения площади выходного экрана. Изображение, образующееся на выходном экране ЭОП, рассматривается через увеличительную оптическую систему или передается с помощью телевизионной установки. Чувствительность ЭОП примерно такая же, что и флуороскопическая чувствительность, применение ЭОП позволяет

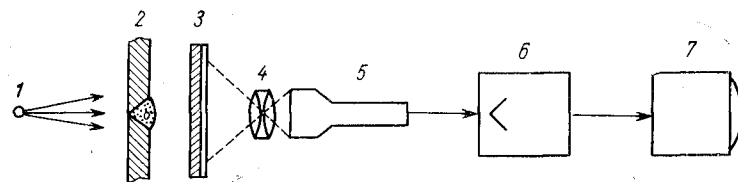


Рис. 59. Схема визуального метода контроля с применением телевизионной установки:

1 — источник излучений; 2 — контролируемый предмет; 3 — флуороскопический экран (вместо экрана может быть использован ЭОП); 4 — оптическая система; 5 — передающая телевизионная трубка; 6 — усилитель; 7 — телевизионный приемник.

производить просвечивание при повышенных напряжениях на рентгеновской трубке (до 250 кВ).

Телевизионные установки. Применение телевизионных установок для передачи флуороскопического изображения на расстояние позволяет автоматизировать процесс контроля и значительно уменьшить опасность облучения обслуживающего персонала ионизирующим излучением. Схема флуороскопического контроля с применением телевизионной установки показана на рис. 59. При телевизионной передаче флуороскопического изображения происходит одновременное усиление его яркости. Четкость передаваемого изображения зависит от числа строк телевизионной установки. Отечественной промышленностью выпускаются телевизионные установки типа ПТУ-23, ПТУ-24, ПТУ-102, ПТУ-103 и др.

Стереотелевизионный дефектоскоп. В стереотелевизионном дефектоскопе просвечивание контролируемого изделия осуществляется двумя источниками излучения на два разделенных экрана (рис. 60). Флуороскопические изображения, полученные под различными углами, передаются с помощью двух телевизионных установок на два экрана — правый и левый. Оба изображения рас-

сматриваются через специальную стереоскопическую систему, и перед наблюдателем возникает объемная картина

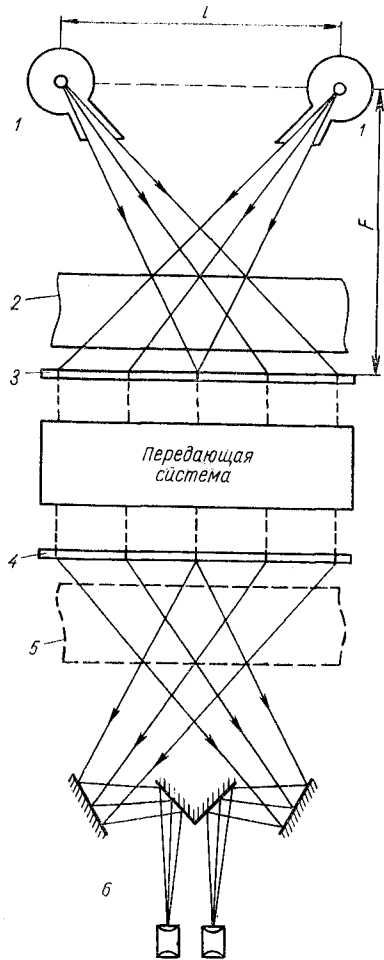


Рис. 60. Схема образования стереоскопического изображения контролируемого изделия в стереотелевизионном дефектоскопе:

1 — источник излучения; 2 — контролируемый предмет; 3 — передающие флуороскопические экраны; 4 — приемные экраны; 5 — объемное изображение просвечиваемого предмета; 6 — стереоскопическая система.

внутреннего строения просвечиваемого объекта. Соотношение между фокусным расстоянием F , расстоянием между источниками излучения l и положением просвечиваемого предмета определяется из условий оптимального стереоскопического (объемного) видения. Использование стереоскопического видения позволяет измерять размеры и глубину залегания дефектов в контролируемом изделии [10].

Область применения флуороскопии. В промышленности флуороскопические методы применяются главным образом для контроля качества материалов и заготовок деталей между различными технологическими процессами, для контроля механизмов, отдельных узлов и т. д. Флуороскопический метод контроля с успехом можно применять также для контроля готовых деталей и изделий, выпускаемых в большом количестве, при условии, что он удовлетворяет требованиям контроля. В табл. 32 приводятся области применения методов флуороскопического кон-

Таблица 32

Область применения методов флуороскопии [1]

Методы флуороскопии	Интервал напряжений на рентгеновской трубке, кв	Толщина просвечиваемого материала, мм		
		Сплавы на основе		
		магния	алюминия	железа
Флуороскопия	30—150	10—90	6—60	—
Электронно-оптические преобразователи	30—250	110—200	75—150	6—25
Телевизионные установки	30—2000	110—200	75—150	25—100

троля, обеспечивающих наиболее высокую чувствительность.

Преимущества и недостатки флуороскопии. По сравнению с радиографией флуороскопический метод контроля имеет ряд преимуществ:

- 1) низкую стоимость;
- 2) высокую производительность;
- 3) непосредственное наблюдение и быструю оценку качества изделий;
- 4) отсутствие необходимости обработки пленки.

Однако флуороскопия имеет два существенных недостатка, ограничивающих ее применение:

- 1) малую четкость изображения вследствие большой нерезкости флуороскопических систем;
- 2) низкую по сравнению с радиографией чувствительность.

**РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
РАДИАЦИОННОЙ
ДЕФЕКТΟΣКОПИИ**

§ 1. ИОНИЗАЦИОННЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ
[15, 23, 25]

Основы метода. В ионизационном методе контроля исследуемый предмет просвечивают по участкам узким пучком ионизирующих излучений. Схема метода изображена на рис. 61. Узкий (коллимированный) пучок излу-

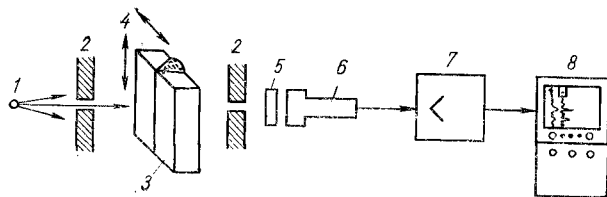


Рис. 61. Схема ионизационного метода контроля:
1 — источник излучения; 2 — коллиматоры; 3 — контролируемый предмет; 4 — направления перемещения; 5 — сцинтилляционный кристалл; 6 — фотоэлектронный умножитель (ФЭУ); 7 — усилитель; 8 — регистрирующий прибор (самопишущий).

чения перемещается по исследуемому изделию, последовательно просвечивая все его участки. Излучение, прошедшее через контролируемый предмет, регистрируется детектором, и на выходе последнего образуется электрический сигнал, величина которого пропорциональна интенсивности прошедшего излучения. Электрический сигнал через усилитель поступает на регистрирующее устройство. Когда пучок ионизирующих излучений перекрывается дефектным участком изделия, амплитуда выходного сигнала изменяется, так как наличие дефекта вызывает изменение ослабления излучения в данном участке изделия. Изменение амплитуды выходного сигнала фиксируется регистрирующим прибором. Таким образом, сравнивая сигналы, соответствующие

различным участкам контролируемого изделия, получают информацию о его качестве.

Чувствительность метода. Относительная чувствительность радиометрического метода контроля определяет минимальный размер дефекта в направлении просвечивания Δd (глубину дефекта), обнаруживаемого этим методом. В случае, когда проекция дефекта в направлении просвечивания полностью перекрывает окно коллиматора, относительная чувствительность радиометрического метода по глубине выражается уравнением:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{B}{\mu d} \cdot \frac{\Delta U_{\text{мин}}}{U},$$

где d — толщина просвечиваемого материала; μ — эффективный коэффициент ослабления излучения в исследуемом материале; B — фактор накопления рассеянного излучения; U — средний сигнал на выходе электронного устройства; $\Delta U_{\text{мин}}$ — минимальное изменение выходного сигнала, регистрируемое прибором (порог чувствительности прибора).

Так как изделие просвечивают узким пучком излучения, то фактор накопления рассеянного излучения близок к единице. Минимальное изменение выходного сигнала $\Delta U_{\text{мин}}$, вызванное наличием дефекта, должно быть больше уровня флуктуаций выходного сигнала $\Delta U_{\text{ф}}$, которые обусловлены статистическим характером образования и поглощения ионизирующего излучения и наличием шумов в электронной аппаратуре ($\Delta U_{\text{мин}} > \Delta U_{\text{ф}}$). Флуктуации выходного сигнала $\Delta U_{\text{ф}}$ определяют порог чувствительности прибора $\Delta U_{\text{мин}}$ и тем самым устанавливают предел чувствительности радиометрического метода контроля. Кроме того, чувствительность ионизационного метода зависит от скорости контроля.

Разрешающая способность ионизационного метода определяет минимальные размеры дефекта в направлении, перпендикулярном просвечиванию (ширину дефекта, обнаруживаемого этим методом).

В случае, когда проекция дефекта не полностью перекрывает окно коллиматора, минимальная ширина обнаруживаемого дефекта будет равна:

$$\Delta X = \frac{S_K B}{S_{\text{кв}}} \cdot \frac{\Delta U_{\text{мин}}}{U},$$

где ΔX — минимальная ширина дефекта; S_k — полная площадь окна коллиматора; S_x — часть площади окна коллиматора, перекрытая проекцией дефекта.

Для увеличения разрешающей способности метода и повышения точности определения размеров дефектных участков необходимо просвечивать изделие по возможности более узким пучком излучения. Однако чрезмерное уменьшение площади поперечного сечения пучка излучения значительно уменьшает интенсивность излучения в пучке, вследствие чего амплитуда сигнала на выходе прибора уменьшается — чувствительность ионизационного метода ухудшается.

Выявляемость дефектов. Разрешающая способность ионизационного метода контроля определяется соотношением размеров дефекта и площади окна коллиматора и зависит от чувствительности ионизационного метода. Это вызвано тем, что наличие дефекта в изделии устанавливается по изменению суммарной интенсивности излучения, измеряемой по площади поперечного сечения пучка излучения, равной площади окна коллиматора. При этом одинаковое изменение интенсивности излучения в пучке может быть обусловлено двумя различными по форме дефектами (с различными размерами по ширине и глубине), если эти дефекты имеют примерно равные объемы. Таким образом, в ионизационном методе контроля почти невозможно установить точную форму дефекта, поэтому принято характеризовать выявляемость дефектов чувствительностью метода по площади дефекта

$$S_{x \text{ мин}} \approx \frac{S_k}{\Delta d} \cdot \frac{B}{\mu} \cdot \frac{\Delta U_{\text{мин}}}{U}$$

и чувствительностью метода по объему дефекта

$$V_{x \text{ мин}} \approx S_k \frac{B}{\mu} \cdot \frac{\Delta U_{\text{мин}}}{U},$$

где $S_{x \text{ мин}}$ — площадь проекции минимального выявляемого дефекта, а $V_{x \text{ мин}}$ — его объем.

Коллиматоры. Коллиматор — защитный экран или блок из толстого свинца с отверстием, применяют его для ограничения широких пучков излучения. Коллиматор помещают между источником излучения и контролируемым объектом и просвечивают предмет узким пучком излучения. Для защиты детектора от рассеянного излу-

чения, возникающего в просвечиваемом объекте, между объектом и детектором помещают второй коллиматор. Оба коллиматора располагают таким образом, чтобы их окна находились на одной оси. Размер окна коллиматора устанавливают в зависимости от требуемой разрешающей способности метода, размеров и чувствительности применяемого детектора излучения. Площадь окон коллиматоров в современных ионизационных дефектоскопах составляет 1 см^2 .

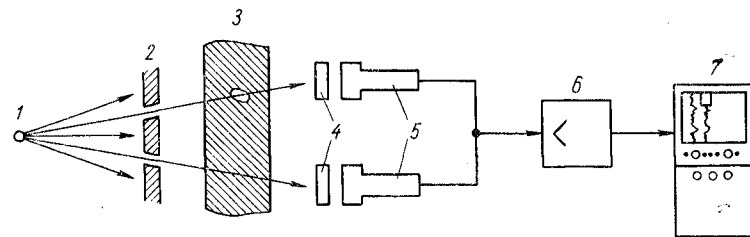


Рис. 62. Дифференциальная схема ионизационного метода контроля:

1 — источник излучения; 2 — коллиматор; 3 — контролируемый предмет; 4 — сцинтилляционные кристаллы; 5 — фотоэлектронные умножители (ФЭУ); 6 — дифференциальный усилитель; 7 — регистрирующий прибор (самонаписущий).

Перемещение пучка излучения и изделия. Перемещать пучок излучения по просвечиваемому изделию можно двумя способами. В переносных малогабаритных дефектоскопах источник излучения и детектор жестко закреплены на одной прямой и перемещаются относительно неподвижного контролируемого изделия. При использовании мощных источников излучения (например, бетатронов для контроля толстостенных изделий) удобнее перемещать контролируемое изделие в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Дифференциальная схема ионизационного метода контроля приведена на рис. 62. Контролируемое изделие просвечивают двумя узкими пучками излучения, которые на выходе из просвечиваемого объекта регистрируются двумя отдельными детекторами излучения. Сравнивающее устройство выделяет сигнал, равный разности сигналов обоих детекторов. При отсутствии дефекта на пути пучков излучения в изделии сигнал на выходе электронного устройства отсутствует. Если же один из пучков излучения проходит через дефектный

участок изделия, то в сравниваемом устройстве возникает электрический сигнал, по полярности которого устанавливается направление, в котором обнаружен дефект. Дифференциальная схема позволяет значительно повысить чувствительность ионизационного метода контроля.

Детекторы излучений. В ионизационном методе контроля материалов и изделий для регистрации ионизирующих излучений применяют ионизационные камеры, газоразрядные и сцинтилляционные счетчики. Ионизационные камеры стабильны в работе, однако при их использовании нельзя получить высокую чувствительность. Так, например, при контроле стального литья толщиной 300 мм ионизационными камерами обнаруживаются дефекты протяженностью не менее 5% с площадью поперечного сечения 1 см².

Применение газоразрядных и сцинтилляционных счетчиков значительно повышает чувствительность ионизационного метода; при контроле стали толщиной 200—300 мм она равна 3% для газоразрядных и 0,5% для сцинтилляционных счетчиков.

Расшифровка. Увеличение сигнала на выходе электронной схемы свидетельствует о том, что в соответствующем участке изделия обнаружен дефект, например раковина, пустота, трещина, непровар или включение из более легкого материала, чем основной материал.

Уменьшение сигнала означает наличие включения, более плотного, чем основной материал, или увеличение толщины изделия. Для получения изображения просвечиваемого изделия можно применить соответствующие методы записи электрических сигналов с фиксацией их на бумагу.

Область применения. Ионизационный метод применим для контроля сварных и литых изделий из плотных материалов. Особенно эффективно его применять при контроле материалов и изделий большой толщины: стали до 500 мм, алюминия до 1000 мм, магния и пластмасс до 1500—2000 мм. Наивысшая чувствительность, достижимая при контроле материалов и изделий такой толщины, составляет 0,3—0,5%, что соответствует объемной чувствительности 0,3—0,7 см³. Нижний предел толщины контролируемых материалов и изделий ограничивается разрешающей способностью ионизационного метода контроля и составляет 60—90 мм для стали.

Типы ионизационных гамма-дефектоскопов

Гамма-дефектоскоп для контроля литья предназначен для контроля литых изделий толщиной 100—500 мм. Источник излучения Co⁶⁰. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик (кристалл иодистого цезия, активированного таллием, и фотоумножитель ФЭУ-19). Выходной сигнал с ФЭУ усиливается ламповым усилителем постоянного тока и регистрируется самопишущим потенциометром БШ-102. Производительность контроля 20—30 см² в 1 мин. Достижимая чувствительность 1—2%.

СГД-1 — сцинтилляционный гамма-дефектоскоп (разработан в ЦНИИТМаш). Предназначен для контроля стальных изделий толщиной 50—180 мм. Скорость контроля в зависимости от требуемой чувствительности от 18 до 180 м/ч. Источник излучения — Co⁶⁰, детектор — сцинтилляционный счетчик.

ИСД — импульсный сцинтилляционный дефектоскоп, собран по дифференциальной схеме. Предназначен для контроля материалов изделий толщиной до 500 мм по стали. Источник излучения — бетатрон на 30 Мэв, детекторы — сцинтилляционные счетчики. Достижимая чувствительность 0,5%. Производительность контроля — 10 см²/сек.

БД-2 — бетатронный дефектоскоп (разработан Томским политехническим институтом) предназначен для контроля многослойных сварных швов в толстостенных изделиях. Толщина контролируемых изделий 50—400 мм по стали. Производительность контроля до 5 м²/ч. Чувствительность дефектоскопа при производительности 3 м²/ч не хуже 1%. Время непрерывной работы 7 ч. Ширина контролируемой за один проход зоны — 100 мм. Источник излучения — бетатрон на 25 Мэв. Детекторы излучения — сцинтилляционные счетчики (можно использовать и рентгеновскую пленку).

Достоинства и недостатки ионизационного метода контроля. Ионизационный метод контроля обладает высокой производительностью, соответствующей скорости основных производственных процессов, и по чувствительности превосходит радиографический метод контроля. Применение его дает возможность автоматизировать контроль качества материалов и изделий в непрерывном технологическом процессе.

Недостаток ионизационного метода контроля — возможность выявления характера и формы дефектов и глубины их залегания в изделии.

§ 2. РАДИАЦИОННАЯ ТОЛЩИНОМЕТРИЯ [1, 2, 6, 27]¹

По принципу измерения и по способам регистрации ионизирующих излучений радиационную толщинометрию можно отнести к радиометрическим методам

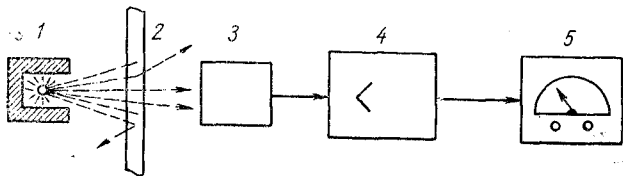


Рис. 63. Схема измерения толщины материала по ослаблению излучения:

1 — источник излучения с защитой; 2 — измеряемый материал; 3 — детектор излучения; 4 — усилитель; 5 — регистрирующий прибор.

радиационной дефектоскопии, однако она отличается от последней по характеру решаемых ею задач. Измерение толщины материалов и покрытий методами радиационной толщинометрии основано на ослаблении ионизирующих излучений или на отражении (обратном рассеянии) излучения от материалов. В соответствии с этим существует два метода измерения толщины материалов: метод поглощения и метод отражения излучений.

Измерение толщины по ослаблению излучений. Схема измерения толщины материалов по ослаблению излучения показана на рис. 63.

Прошедшее через измеряемый материал излучение содержит информацию о его толщине и регистрируется детектором излучения. Электрический сигнал, пропорциональный интенсивности прошедшего излучения, с выхода детектора излучения поступает через усилитель на измерительный прибор, шкала которого проградуирована в единицах толщины измеряемого материала. Таким

¹ Этот раздел изложен в справочнике в связи с тем, что лаборатории радиационной дефектоскопии часто решают вопросы толщинометрии и используют соответствующую аппаратуру.

образом, показание измерительного прибора M является функцией прошедшего излучения $M = KI$, где K — коэффициент пропорциональности между сигналом детектора и показанием измерительного прибора.

Чувствительность системы. Чувствительность системы измерения толщины S определяется как изменение показаний прибора ΔM в зависимости от изменения измеряемой толщины Δd и выражается соотношением

$$S = \frac{\Delta M}{\Delta d} = -K\mu I_0 e^{-\mu d} = \mu M.$$

Наивысшая чувствительность достигается при максимальных значениях μM , однако увеличение чувствительности ограничивается неточностью показаний измерительного прибора, обусловленной либо погрешностью самой аппаратуры, либо статистическими флуктуациями излучения, которые регистрируются детектором излучения, а следовательно, и измерительным прибором.

Статистическая погрешность измерения. Флуктуации, возникающие при образовании, ослаблении и регистрации ионизирующего излучения, приводят к тому, что сигнал на выходе детектора излучения непрерывно колеблется около средней величины. Такое отклонение выходного сигнала от его среднего значения характеризуется средним квадратическим отклонением сигнала σM , и его можно рассматривать как фактическое изменение чувствительности детектора. Вследствие изменения чувствительности детектора измеряемую толщину d определяют с некоторой статистической погрешностью σd

$$\sigma d = \frac{\sigma M}{S} = - \frac{e^{-\mu d/2}}{\mu \sqrt{I_0 t \xi}},$$

где t — время измерения; ξ — эффективность, с которой излучение преобразуется детектором в выходные сигналы.

Относительная статистическая погрешность измерения толщины вследствие флуктуаций ионизирующего излучения будет равна

$$\frac{\sigma d}{d} = \frac{e^{\mu d/2}}{d} \cdot \frac{1}{-\mu \sqrt{I_0 t \xi}}.$$

Как следует из этого равенства, для уменьшения статической погрешности необходимо увеличивать ин-

тенсивность излучения I_0 , активность или мощность источника излучения, время измерения t и эффективность регистрации излучения детектором ξ .

Погрешность измерительной аппаратуры. Погрешность измерительной аппаратуры может быть обусловлена наличием шумов в электронной схеме, инерционностью измерительного прибора и, наконец, неточностью считывания показаний измерительного прибора с его шкалы. Любая измеряемая величина определяется с точностью, равной половине цены наименьшего деления шкалы измерительного прибора. Вследствие аппаратной погрешности показание измерительного прибора M будет определяться с некоторой погрешностью ΔM , что приведет к измерению толщины материала с погрешностью Δd . Относительная аппаратная погрешность измерения толщины материала аналогична относительной статистической погрешности и равна

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta M}{dS} = \frac{e^{\mu d}}{d} \cdot \frac{\Delta M}{\mu K I_0}$$

Аппаратурная погрешность уменьшается с увеличением интенсивности излучения I_0 (активности или мощности источника) и коэффициента пропорциональности K между показанием измерительного прибора и интенсивностью прошедшего излучения. Выбор параметров для достижения наивысшей точности измерения основывается на отыскании минимальных значений статистической и аппаратной погрешности. Однако, так как статистическая погрешность становится минимальной при толщине $d = \frac{2}{\mu}$, а аппаратная погрешность достигает минимального значения при толщине $d = \frac{1}{\mu}$, то оптимальный выбор параметров требует некоторого компромисса.

Эталонный метод измерения толщины. Для измерения толщины материалов и изделий с помощью эталонов необходимо иметь набор эталонов различной толщины, изготовленных из того же материала, что и измеряемый образец (изделие). Толщину эталонов подбирают таким образом, чтобы показания регистрирующего прибора, соответствующие просвечиванию измеряемого образца и эталонов, были равны. При этом измеряемая толщина образца оказывается равной известной толщине этало-

нов, а точность измерения зависит от точности изготовления эталонов.

Дифференциальный метод измерения толщины. В практике часто возникает потребность не в абсолютном измерении толщины материала, а лишь в контроле отклонения толщины от заданной. В этом случае удобно

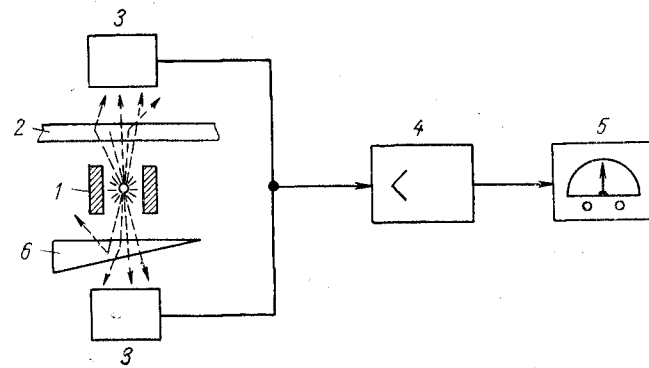


Рис. 64. Дифференциальная схема измерения толщины: 1 — источник излучения с защитой; 2 — контролируемый материал; 3 — детекторы излучения; 4 — усилитель; 5 — регистрирующий прибор; 6 — поглощающий клин.

применять дифференциальный метод измерения толщины. Схема установки с дифференциальным включением двух детекторов излучения показана на рис. 64. Один детектор регистрирует излучение, прошедшее через измеряемый материал, на другой излучение от того же источника попадает через поглощающий клин. Дифференциальная схема включения детекторов излучения позволяет выделить разность сигналов обоих детекторов. Установку настраивают без измеряемого материала при полностью выведенном клине, регулируя режимы работы детекторов таким образом, чтобы сигнал на выходе был равен нулю. Для определения отклонения толщины материала от заданной поглощающий клин устанавливают в положение, при котором ослабление излучения в клине и в контролируемом материале заданной толщины одинаково. При этом, если контролируемый материал имеет заданную толщину, сигнал на регистрирующем приборе отсутствует. При отклонении толщины материала от заданной на выходе схемы появляется сигнал рассогласования положительной или отрицатель-

ной полярности. Величина сигнала пропорциональна величине отклонения толщины материала от заданного значения, его полярность указывает направление изменения толщины — уменьшение или увеличение.

Балансный метод измерения толщины. Балансная (компенсационная) схема измерения толщины материала

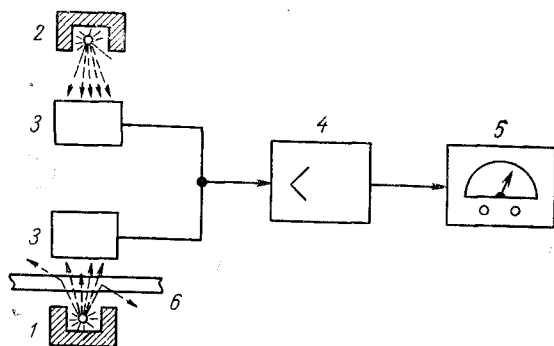


Рис. 65. Балансный метод измерения толщины: 1 — рабочий источник излучения с защитой; 2 — компенсирующий источник излучения с защитой; 3 — детекторы излучения; 4 — усилитель; 5 — регистрирующий прибор; 6 — измеряемый материал.

лов наиболее часто применяется при использовании в качестве источников излучения радиоактивных изотопов.

Схема балансной установки для измерения толщины изображена на рис. 65. Установка содержит два источника излучения — рабочий и компенсирующий, и два детектора излучения, включенных по мостовой схеме. Применение компенсирующего источника позволяет компенсировать изменение активности рабочего источника со временем, обусловленное радиоактивным распадом, благодаря чему нулевое показание прибора (показание прибора без измеряемого материала) и цена делений шкалы остаются постоянными с течением времени. Рабочий и компенсирующий источники изготавливают из одного и того же радиоактивного изотопа, а срок их годности определяется требуемой точностью измерения.

Измерение толщины по отражению излучения.

В практике часто возникает необходимость измерить толщину изделия или материала с односторонним до-

ступом к ним, например толщину покрытий или стенок труб и емкостей, не имеющих доступа изнутри. В этом случае применяется метод измерения толщины материалов, основанный на регистрации отраженного от материалов излучения. Интенсивность излучения, отраженного под углом 180° , возрастает с увеличением толщины отражающего материала и достигает насыщения при определенной толщине d_n .

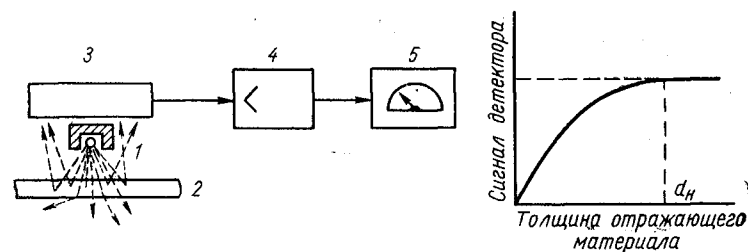


Рис. 66. Схема измерения толщины по отраженному излучению и зависимость сигнала детектора от толщины отражающего материала:

1 — источник излучения с защитой; 2 — измеряемый материал; 3 — детектор излучения; 4 — усилитель; 5 — регистрирующий прибор.

На рис. 66 изображена схема измерения толщины по отраженному излучению и зависимость сигнала детектора от толщины отражающего материала. Источники излучения располагаются между измеряемым материалом и детектором излучения. Регистрация отраженного излучения возможна на фоне прямого излучения источника, и поэтому защита детектора от прямого излучения не обязательна. Толщина отражающего материала d_n , при которой сигнал детектора достигает максимальной величины, является максимальной толщиной, доступной измерению данным методом.

Измерение толщины покрытий. Возможность бесконтактного метода измерения толщины материалов при одностороннем доступе к ним по отраженному излучению особенно широко применяется для измерения толщины покрытий.

Как правило, толщина покрытия во много раз меньше толщины самого изделия (подложки), поэтому излучение отражается не только материалом покрывающего слоя, но и материалом изделия. Интенсивность отраженного излучения пропорциональна Z^n (Z — атом-

ный номер отражающего материала, а n — экспериментальный показатель степени). Поэтому при измерении толщины покрытия величина выходного сигнала детектора зависит от отношения атомных номеров материала покрытия Z_1 и материала подложки (изделия) Z_2 .

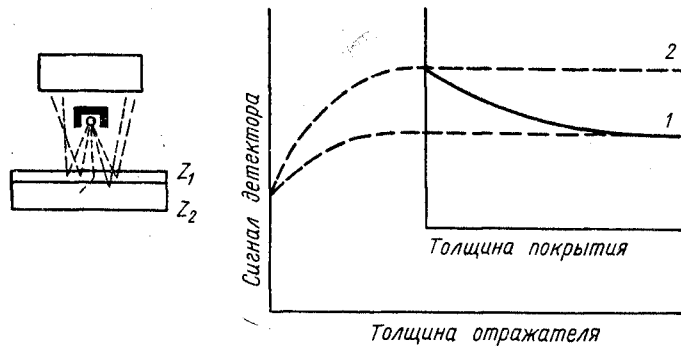


Рис. 67. Измерение лакового покрытия на металле.

В соответствии с этим возможны два случая измерения толщины покрытия — первый при $Z_1 < Z_2$ и второй при $Z_1 > Z_2$.

1. Атомный номер материала покрытия Z_1 меньше атомного номера материала подложки Z_2 . На рис. 67 приводится пример измерения толщины легкого покрытия на тяжелой подложке (лак на металле) методом отраженного излучения. Пунктирные линии 1 и 2 изображают зависимость сигнала детектора от толщины материалов с атомными номерами Z_1 и Z_2 соответственно. Кривая 2 лежит выше кривой 1, так как $Z_2 > Z_1$. Чтобы при измерениях не сказывалось влияние подложки, ее толщина должна быть равна или больше толщины насыщения d_n . В этом случае при нулевой толщине покрытия сигнал детектора будет максимальным. Изменение величины сигнала детектора, обусловленное покрытием, показано сплошной кривой. При возрастании толщины покрытия от нуля до толщины насыщения в материале покрытия сигнал детектора уменьшается от максимального значения до величины, соответствующей насыщению отраженного излучения в материале покрытия (от кривой 2 до кривой 1).

2. Атомный номер материала покрытия Z_1 больше атомного номера материала подложки Z_2 . На рис. 68

показан пример измерения толщины тяжелого покрытия на легкой подложке (олово на жести) по отраженному излучению. Пунктирные кривые 1 и 2 изображают зависимость сигнала детектора от толщины отражающего материала покрытия и подложки соответственно. В этом

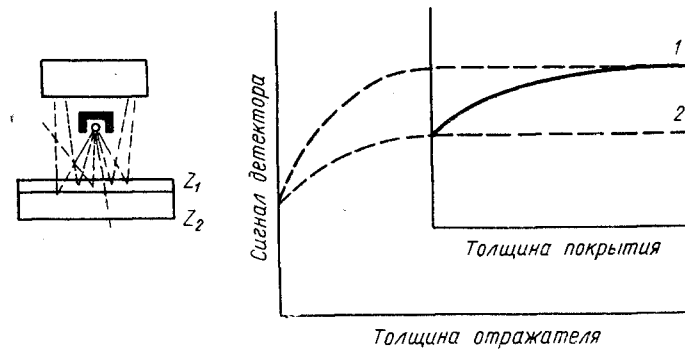


Рис. 68. Измерение толщины оловянного покрытия на жести.

случае кривая 1 лежит выше кривой 2, так как $Z_1 > Z_2$. При изменении толщины покрытия от 0 до толщины насыщения сигнал детектора увеличивается от величины, соответствующей максимальному отражению от материала подложки, до величины, соответствующей максимальному отражению от материала покрытия — сплошная кривая.

Чувствительность метода отражения. Точность измерения толщины покрытия методом отраженного излучения, так же как и при измерениях толщины по ослаблению излучения, определяется статистическими и аппаратными погрешностями, которые находятся по аналогичным уравнениям соответственно:

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{e^{\mu_p d}}{d} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^n - \left[\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^n - 1\right] e^{\mu_p d}}}{\mu_p \sqrt{I_2 t \xi \left(\frac{Z_1}{Z_2}\right) - 1}},$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{e^{\mu_p d}}{d} \cdot \frac{\Delta M}{\mu_p K I_2 \left[\left(\frac{Z_1}{Z_2}\right)^n - 1\right]},$$

где Z_1 — атомный номер материала покрытия; Z_2 — атомный номер материала подложки; d — измеряемая толщина покрытия; μ_p — эффективный коэффициент отражения (примерно в два-три раза больше линейного коэффициента ослабления); I_2 — интенсивность излучения, отраженного от подложки при нулевой толщине покрытия (реакция детектора); n — экспериментальный показатель степени (для β -излучения равен $3/4$); t — время измерения; ξ — эффективность регистрации излучения детектором; K — коэффициент пропорциональности между сигналом детектора и показанием регистрирующего прибора.

Для более точного измерения толщины покрытий необходимо, чтобы атомные номера материала покрытия и подложки отличались друг от друга на несколько единиц (не менее 3—4). Обычно чувствительность и точность измерения методом отражения хуже, чем методом ослабления.

Источники излучения. В толщинометрии применяют источники γ - и β -излучения. Вид излучения источников и его энергию выбирают в зависимости от измеряемой толщины и плотности материала.

Активность источников определяется требуемой точностью измерения. В табл. 3 даны основные изотопы, из которых изготовляют радиоактивные источники.

Энергия излучения определяется измеряемой толщиной и плотностью материала. Для измеряемой толщины d линейный коэффициент поглощения излучения должен составлять $\frac{1}{d}$ или $\frac{2}{d}$ в зависимости от требуемой точности измерения. Линейный коэффициент поглощения μ зависит в основном от энергии излучения и в меньшей мере от других факторов, как, например, геометрии детектора, материала контейнера источника и типа измеряемого материала. Поглощение γ -излучения происходит фактически в случае геометрии узкого пучка. Однако при измерениях толщины отклонения от геометрии узкого пучка невелики и можно использовать коэффициенты ослабления для узкого пучка.

Выбор источников γ -излучения основывается на рассмотрении коэффициентов ослабления для измеряемых материалов и толщин. При комптоновском рассеянии γ -квантов ослабление излучения зависит от количества рассеивающих электронов. Для всех легких элементов,

кроме водорода, масса материала почти пропорциональна количеству электронов.

Выбор источников β -излучения более сложен, так как ослабление β -излучения не является экспоненциальным. Однако при непрерывном спектре β -излучения его поглощение грубо можно считать экспоненциальным. В контрольно-измерительном приборе такие факторы, как рассеяние и возникновение тормозного излучения, делают эту зависимость почти точной. Для предварительной оценки изотопов по линейному коэффициенту ослабления μ можно применять эмпирическое правило

$$\mu = 17\rho E_{\max}^{-1,14},$$

где ρ — плотность материала, E_{\max} — максимальная энергия β -электронов спектра, $Mэв$.

Чтобы избежать измерений вблизи концов точек кривой поглощения, необходимо знать максимальный пробег β -частиц в поглотителе. Эмпирическая зависимость максимального пробега электронов R_{\max} (в $мг/см^2$) от их энергии имеет вид:

$$R_{\max} = 412E^b,$$

где $b = 1,265 - 0,954 \ln E$; E — выражается в $Mэв$ в области энергий от 0,01 до 3 $Mэв$.

Активность источника выбирают в соответствии с требуемой точностью измерений. Неточность измерения обратно пропорциональна активности источника. При использовании короткоживущих изотопов с малым периодом полураспада необходимо следить за сохранением требуемой точности измерения. Обычно активность источников берут несколько большей оптимальной активности, а в измерительную аппаратуру вводят устройство, компенсирующее уменьшение активности источников со временем.

Весовая толщина. Измерение толщины материалов с помощью ионизирующих излучений осуществляется не в отдельной точке, а на некотором участке поверхности материала. Так как ослабление или отражение (обратное рассеяние) излучения пропорционально количеству электронов в поглощающем или отражающем материале, а количество электронов, в свою очередь, примерно пропорционально плотности материала, то интенсивность ослабленного или отраженного излучения фактически содержит информацию о количестве вещества,

находящегося на измеряемом участке, т. е. о весе этого участка. Поэтому в толщинометрии принято определять толщину материала массой единицы площади, подвергаемой облучению, — весовой толщиной, и измерять в $г/см^2$. При этом измеряемая по прибору толщина материала оказывается усредненной по измеряемому участку, а действительная толщина в отдельных точках измеряемого участка может значительно отличаться от измеряемой. Для повышения достоверности показаний прибора необходимо уменьшать площадь облучаемого участка, однако при этом значительно уменьшается интенсивность ослабленного или отраженного излучения, вследствие чего резко возрастают статистическая и аппаратная погрешности измерения.

Детекторы излучения. Для регистрации ионизирующего излучения в радиационной толщинометрии применяют ионизационные камеры, газоразрядные, полупроводниковые и сцинтилляционные счетчики.

1. Ионизационные камеры. Основное преимущество ионизационных камер заключается в их стабильности, т. е. выходной ток не зависит от напряжения на электродах в режиме насыщения. Они служат продолжительное время и просты в обращении. Недостаток ионизационных камер — низкая эффективность регистрации излучения.

2. Газоразрядные счетчики. Когда чувствительность ионизационных камер оказывается недостаточной для регистрации излучения, применяют счетчики Гейгера — Мюллера. Устойчивость и продолжительность работы этих счетчиков по сравнению с ионизационными камерами незначительна. Так как скорость счета изменяется при колебаниях анодного напряжения, то необходимо обеспечить высокую стабилизацию напряжения. Эффективность регистрации β -излучения в счетчиках Гейгера — Мюллера достигает 90%, что позволяет повысить точность измерения по сравнению с ионизационными камерами.

3. Сцинтилляционные счетчики. Наиболее часто в толщинометрии применяют сцинтилляционные счетчики, имеющие достаточно высокую устойчивость в работе, повышенную чувствительность и большую эффективность регистрации излучения. Помимо применения сцинтилляционного счетчика для регистрации излучения его можно использовать в качестве спектрометра, так как величина

сигнала счетчика зависит от энергии кванта или частицы. При измерении толщины по принципу отражения излучения можно различать рассеянное излучение (с малой энергией) от прямого излучения.

Область применения. Радиационную толщинометрию применяют для контроля толщины выпускаемой продукции и различных защитных покрытий.

Бесконтактное определение измеряемой толщины и возможность измерения при одностороннем доступе к изделию создают условия для автоматизации контрольных операций. С помощью приборов радиационной толщинометрии осуществляется не только пассивный контроль выпускаемой продукции, но и активное регулирование технологических процессов, таких, как, например, горячий и холодный прокат металлов, нанесение покрытий и др.

Приборы для радиационной толщинометрии. Отечественная промышленность выпускает серийно большое количество типов толщиномеров, основанных на применении ионизирующих излучений и предназначенных для различных нужд радиационной толщинометрии: измерения толщины проката (горячего и холодного), измерения толщины изделий, стенок труб и емкостей, определения разностенности труб и измерения толщины покрытий. В табл. 33 приводятся основные характеристики приборов, применяемых в радиационной толщинометрии. Часть приборов в настоящее время снята с производства, однако эти приборы можно еще использовать по своему назначению, а потому они включены в таблицу.

Измерители толщины

1. Установка для измерения толщины металлической ленты. Установка предназначена для автоматического непрерывного и дистанционного измерения толщины холоднокатаной металлической ленты в процессе ее обработки. Установка работает по принципу ослабления β -излучения. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик ФЭУ-19 со стильбеновым кристаллом.

Высота зазора между источником излучения и детектором 8 мм. Минимальная ширина измеряемой ленты 40 мм. Зона измерения от края по ширине ленты 200 мм. Время прохождения стрелкой всей шкалы измерительного прибора 3 сек.

Основные характеристики радиоактивных измерителей

Наименование прибора	Тип прибора	Радиоактивный источник излучения	Измеряемый материал	Пределы измерения	
				толщина, мм	весовая толщина, г/м ²
Установка для измерения толщины металлического листа	—	²⁰⁴ Tl	Сталь	0,002—0,15	—
			Никель	0,003—0,1	—
		⁹⁰ Sr	Алюминий	0,003—0,4	—
			Сталь	0,03—0,6	—
		¹⁴⁴ Ce	Никель	0,04—0,5	—
			Алюминий	0,09—2,5	—
Измеритель толщины	ИТУ-495	⁹⁰ Sr ¹⁴⁴ Ce	Сталь	0,03—0,8	—
			»	0,05—1,0	—
Измеритель толщины широкого листа	ИТШ-496	⁹⁰ Sr ¹⁴⁴ Ce	Сталь	0,03—0,8	—
			Сталь	0,05—1,0	—
Универсальный радиоактивный измеритель толщины	УРИТ-1	—	—	—	50—500

толщины материалов, покрытий и разностенности труб

Погрешность измерения	Напряжение питания частотой 50 гц, в	Потребляемая мощность, вт	Габариты, мм	Общий вес, кг	Завод-изготовитель или разработавшая организация
±0,5 мкм ±0,5 » ±1,5 » ±2,0 » ±2,0 » ±5,0 » ±2,0 » ±2,0 »	220, 127, через ферро-резонансный стабилизатор СНЭ-120-0,1	—	Измерительный блок 120×700×290	—	Разработан ЦЛА Энерго-чермет
+1,5% но не точнее ±3 мкм	127, 220 через ферро-резонансный стабилизатор С-0,09	140	1) Измерительный блок 800×235×390; 2) указатель 161×297×362; 3) усилитель 300×421×425; 4) стабилизатор напряжения 243×340×160	130,6	Выпускается заводом КИП, г. Таллин
±1,5%, но не точнее ±3 мкм	То же	75	1) Измерительный блок 536×235×355; 2) указатель 161×297×362; 3) усилитель 300×421×425; 4) стабилизатор напряжения 243×340×160	110,6	Там же
—	220	330	1) Датчик с источником ∅113×622; 2) измерительный блок 308×166×216; 3) реле времени 140×145×270; 4) релейный блок 140×145×270; 5) сигнализационный блок 140×145×270	30	Там же

Наименование прибора	Тип прибора	Радиоактивный источник излучения	Измеряемый материал	Пределы измерения		Погрешность измерения	Напряжение питания частотой 50 гц, в	Потребляемая мощность, вт	Габариты, мм	Общий вес, кг	Завод изготовитель или разработавшая организация
				толщина, мм	весовая толщина, г/м ²						
Измеритель толщины	ИТ-5150	¹⁷⁰ Tm	Сталь	0,4—3	—	±1,5%, не точнее ±10 мкм	220	150	—	—	Разработан ЦЛА Министерства строительства РСФСР
Радиоактивный толщиномер	ТР-3	¹⁷⁰ Tm	Сталь	0,5—5,0	—	±5%	110, 127, 220	57	186×358×370	15	—
Радиоизотопный индикатор толщины технологический	РИТ-2Т	¹⁴⁷ Pm	Органические пленки, бумага	—	20—200	±2%, но не точнее ±2 г/м ²	220	350	1) Датчик 320×238×184; 2) указатель 364×297×164; 3) блок усиления 400×400×392	45	Выпускается заводом КИП, г. Таллин
Измеритель толщины горячего проката	ТД-1	¹³⁷ Cs	Сталь	15—45	—	±0,2 мм	220	600	—	—	Разработан ЦНИИчермет
Разностенномер-толщиномер	Р-4	¹³⁷ Cs ²⁰⁴ Tl (тормозное излучение)	Листы стали Трубы Ø 30÷100 мм	0—6 0—110	—	±5%	220	—	—	—	То же
Разностенномер для тонкостенных труб	Р-6М	¹⁷⁰ Tm	Трубы Ø120 мм с применением вкладыша Трубы Ø9,8 мм	до 0,8	—	±2%	127, 220	—	—	—	Разработан ЦНИИП Госгортехнадз.р
Измеритель толщины и разностенности труб	—	¹³⁷ Cs	Трубы Ø50—200 мм	6,5—45 мм	—	±1%	—	—	—	—	—
Бета-толщиномер покрытий	БТП-1	²⁰⁴ Tl	Лакокрасочные покрытия	—	До 2 мг/см ²	±2%	220	220	1) Датчик 174×304×292;	15	Выпускался заводом КИП, г. Таллин
			Гальванопокрытия	—	До 30 мг/см ²	—	—	—	2) измеритель 308×166×216	—	

Наименование прибора	Тип прибора	Радиоактивный источник излучения	Измеряемый материал	Пределы измерения	
				толщина, мм	весовая толщина, г/м ²
Бета-толщиномер покрытий	БТП-2	²⁰⁴ Tl	Покрyтия	—	До 65 мг/см ²
Бета-толщиномер покрытий	БТП-3	⁹⁰ Sr	Медь на гетинаксе	10—50 мк	—
Бета-толщиномер покрытий	БТП-4	²⁰⁴ Tl	Цинк или олово на стали	5—50 мк	—
Измеритель толщины покрытий	ИТП-476	²⁰⁴ Tl	Олово на стали	0—5 мк	—
Радиоактивный толщиномер	РТ-2	⁹⁰ Sr	Медь на гетинаксе	0—100 мк	—
Измеритель толщины горячего проката	ЦИТРА	¹³⁷ Sr	Сталь	4—10 10—50 50—100	— — —
Измеритель толщины с весовой толщиной до 800 г/м ²	—	¹⁴⁷ Pm ²⁰⁴ Tl	— —	— —	0—150 0—800
Измеритель толщины с весовой толщиной до 900 г/м ²	—	⁹⁰ Sr ¹⁴⁴ Ce ¹⁰⁶ Ru	— — —	— — —	0—9000 — —
Измеритель толщины металлического проката	—	¹⁷⁰ Tm ⁹⁰ Sr (тормозное излучение)	Сталь Медь Цинк Никель Титан	— — — — —	— — — — —

Погрешность измерения	Напряжение питания частотой 50 гц, в	Потребляемая мощность, вт	Габариты, мм	Общий вес, кг	Завод-изготовитель или разработавшая организация
±2%	220	220	1) Датчик 174×304×292; 2) измеритель 308×166×216	15	Выпускается заводом КИП, г. Таллин
±10%	220	75	317×210×310	9	Там же
±2 мк ±1 мк	220	100	1) Датчик 310×250×230; 2) измеритель 310×220×220	12,5	»
±0,15 мк	127, 220 через стабилизатор	90	—	—	»
±10%	—	—	—	—	Разработан ЦНИИТОП
±0,05 мм ±0,1 мм ±0,25 мм	220	1000	—	—	—
±1,5%	220	—	—	—	—
±1%	220	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—

Наименование прибора	Тип прибора	Радиоактивный источник излучения	Измеряемый материал	Пределы измерения	
				толщина, мм	весовая толщина, г/м ²
Гамма-толщиномер с односторонним доступом	ГТ-1712	⁶⁰ Со	Сталь—воздух	0—12	—
			Сталь—вода	0—8	—
Переносной радиоизотопный отражательный толщиномер	ТОР—1	⁶⁰ Со	Сталь	0,5—5 2—16	— —

2. Измеритель толщины ИТУ-495. Измеритель толщины ИТУ-495 предназначен для автоматического непрерывного измерения толщины движущейся стальной ленты в процессе холодной прокатки. Источник излучения — ¹⁴⁴Се с двухгодичным сроком службы или ⁹⁰Sr практически с неограниченным сроком службы. Детектор излучения — ионизационная камера компенсационного типа.

Шкалу прибора можно проградуировать для измерения толщины проката других металлов. Прибор обеспечивает измерение отклонения толщины материала от заданной в пределах $\pm 0,06$ мм. Минимальная ширина измеряемой ленты 50 мм. Зона измерения (от края ленты) 160 мм. Скорость перемещения стрелки по шкале 150 мкм/сек. Температура окружающей среды от 10—50°С при относительной влажности до 80%. К прибору можно подключить электронный автоматический самопишущий мост ЭМП-69.

3. Измеритель толщины ИТШ-496. Измеритель толщины ИТШ-496 предназначен для автоматического непрерывного измерения толщины широкого металлического листа, движущегося в процессе холодной прокатки. Прибор является модификацией измерителя толщины

Погрешность измерения	Напряжение питания частотой 50 гц, в	Потребляемая мощность, вт	Габариты, мм	Общий вес, кг	Завод-изготовитель или разработавшая организация
$\pm 4\%$ —	220 —	— —	1) Измерительный блок 310×130×190; 2) Датчик 320×75×150; 3) блок питания 410×185×155; 4) Упаковочные ящики 445×335×170	12,8	Выпускается заводом КИП, г. Таллин
$\pm 10\%$	—	—	—	—	ВНИИРТ

ИТУ-495 и имеет одинаковые с ним технические характеристики. Зона измерения (от края ленты) 500 мм.

4. Универсальный радиоактивный измеритель толщины УРИТ-1. Универсальный радиоактивный измеритель толщины предназначен для непрерывного измерения отклонения толщины листовых материалов от эталонной. Прибор работает по принципу ослабления излучения, предусмотрен выход на стационарный самописец и на систему непрерывного регулирования технологическим процессом производства материала.

5. Измеритель толщины ИТ-5250. Прибор предназначен для автоматического непрерывного измерения толщины стальной полосы в процессе холодной прокатки.

Источник излучения — ¹⁷⁰Tm, активность рабочего источника 100 мг-экв Ra, активность компенсационного источника 20 мг-экв Ra. Время работы источника 1 год. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик (CsI и ФЭУ-37). Прибор измеряет усредненную толщину на площадке диаметром 25 мм. Время прохождения стрелкой всей шкалы 3 сек.

Быстродействие (постоянная времени) при отклонениях измеряемой величины на $\pm 10\%$ равно 0,2 сек.

Минимальная ширина стальной полосы 50 мм. Зона измерения (от края полосы) 250 мм. Температура окружающей среды от 10 до 50°С при влажности до 80%.

Измерительный блок работает при температуре измеряемой полосы до +150°С, а также при поливе полосы водой, эмульсией или маслом.

Измеряемую поверхность надо очищать струей сжатого воздуха. Прибор имеет выход для подключения регистрирующего прибора и автоматического сигнализатора АС-5210, а также схемы автоматического регулирования толщины.

6. Радиоизотопный толщиномер ТР-3. Радиоизотопный толщиномер ТР-3 предназначен для измерения толщины стен пустотелых деталей. Прибор работает по принципу ослабления γ -излучения. Толщину контролируемого изделия устанавливают по времени, в течение которого детектор регистрирует определенное число импульсов.

7. Радиоизотопный индикатор толщины технический РИТ-2Т. Прибор предназначен для непрерывного контроля абсолютного значения веса квадратного метра (толщины) движущихся органических пленок или бумажного полотна. Метод измерения компенсационный. Для автоматической записи показаний к прибору подключают стандартный самопишущий потенциометр типа ЭПП или ПСР (с пределами измерения от 0 до 100 мв), через который выходной сигнал может быть подан на систему автоматического регулирования и сигнализации отклонений от установленных номинальных величин толщины. Активность рабочего источника 9 мкюри, компенсационного — 60 мкюри. Минимальная ширина контролируемого полотна 60 мм. Температура среды от +10 до +35°С при влажности до 80%.

8. Измеритель толщины горячего листового проката ТД-1. Прибор предназначен для автоматического измерения толщины горячего проката. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик.

Быстродействие — одно измерение в секунду. Результаты измерения фиксируются в виде отклонения измеряемой толщины от номинальной в пределах $\pm 1,5$ мм. Прибор имеет водоохлаждающую систему с давлением 1—1,5 ат.

9. Измеритель толщины горячего листового проката ЦИТРА. Прибор ЦИТРА (цифровой автоматический

радиоизотопный измеритель толщины) предназначен для автоматического измерения толщины горячего листового проката. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик.

Быстродействие — два измерения в секунду. Результаты измерения фиксируются на цифровом табло в абсолютных значениях толщины и могут регистрироваться на цифропечатающей машине. Имеется система с водяным охлаждением.

10. Радиоактивный измеритель толщины металлического проката с весовой толщиной до 800 г/м². Прибор предназначен для автоматического непрерывного измерения толщины металлической полосы в процессе холодной прокатки или перемотки. Быстродействие (постоянная времени) измерения — 0,2 сек. Минимальная ширина измеряемой полосы 20 мм. Измерения возможны в условиях вибрации при 10—50°С и влажности до 95%.

11. Радиоизотопный измеритель толщины металлического проката с весовой толщиной до 9000 г/м². Прибор по назначению и характеристикам аналогичен предыдущему.

12. Радиоизотопный измеритель толщины металлического проката (стали, меди, никеля, цинка) до 3 мм и титана до 5 мм. Прибор по назначению и характеристикам аналогичен двум предыдущим.

13. Гамма-толщиномер ГТ-1712. Прибор предназначен для измерения толщины листовой стали, толщины стенок стальных труб и т. д. при одностороннем доступе к измеряемому материалу, причем обратная сторона листа может омываться воздухом или жидкостями. Прибор работает по принципу отражения излучения. Активность источника 80 мкюри. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик с кристаллом NaI(Tl). Отраженное излучение выделяется на фоне прямого.

Измерители разностенности труб

14. Разностеномер-толщиномер Р-4. Прибор предназначен для проверки разностенности и толщины стенок труб, а также толщины листового материала при доступе с одной стороны. Прибор работает по принципу ослабления или отражения излучения. Источник излучения — ²⁰⁴Tl (тормозное излучение) или ¹³⁷Cs, детектор — сцинтилляционный счетчик.

15. Разностеномер для тонкостенных труб Р-6М. Прибор предназначен для контроля толщины и разностенности биметаллических тонкостенных труб. Работает по принципу ослабления излучения.

16. Измеритель толщины и разностенности труб. Прибор предназначен для автоматического контроля толщины стенок труб, имеющих минимальную разностенность 0,2—0,3 мм. Отклонение толщины стенок труб за пределы допуска фиксируется световой и звуковой сигнализацией, а дефектный участок трубы автоматически метится краской.

Прибор работает по принципу ослабления излучения, проходящего через две стенки трубы по диаметру. Детектор излучения — сцинтилляционный счетчик. Скорость измерения — 2,2 м/сек.

Измерители толщины покрытий

17. Бета-толщиномер покрытий БТП-1. Прибор предназначен для выборочного контроля отклонения толщины различных покрытий от эталонной, отличающихся по атомному номеру от материала изделия и позволяет измерять следующие покрытия (в мг/см²):

Поливиниловый спирт на цинке	до 0,05
Пигментный слой на меди	до 2,0
Никель на цинке	до 0,03
Никель на гарте	до 30,0
Хром на меди	до 10,0
Хром на цинке	до 10 0

Весовая толщина измеряется на площадке диаметром не менее 50 мм. Температура окружающей среды 10—35°С при влажности до 80%.

18. Бета-толщиномер покрытий БТП-2. Прибор по назначению и характеристикам аналогичен БТП-1, но имеет более широкие пределы измеряемых толщин (до 65 мг/см²).

19. Бета-толщиномер покрытий БТП-3. Прибор предназначен для выборочного контроля толщины различных покрытий на небольших площадях по отраженному излучению. Детектор излучения — газоразрядные счетчики типа СТС-5. Весовая толщина измеряется на площадке 6 мм² (2×3). Время проведения одного измерения не более 1 мин. Прибор работает при температуре 10—35°С при влажности до 80%.

20. Бета-толщиномер покрытий БТП-4. Прибор предназначен для выборочного контроля цинкового или оловянного покрытия на стальной основе по отраженному излучению. Детектор излучения — ионизационная камера. Весовая толщина измеряется на площадке диаметром 40 мм. Толщина измеряемой детали должна быть не менее 5 мм. Прибор можно использовать как для абсолютного измерения толщины покрытия, так и для контроля за ее отклонением от заданной величины. Прибор работает при 10—35°С и влажности до 80%.

21. Измеритель толщины покрытий ИТП-476. Прибор предназначен для измерений толщины оловянного покрытия при выборочном контроле на любой стороне стальной полосы (листа) размерами не менее 200×150 мм и толщиной не менее 0,18 мм при горячем или электролитическом лужении. Измерения проводят с одной стороны листа с плоской поверхностью на площади 70×130 мм. Минимальная ширина измеряемой ленты 90 мм. Зона измерения может находиться на расстоянии не более 160 мм от края ленты.

22. Радиоактивный толщиномер РТ-2. Прибор предназначен для контроля толщины медных проводников на гетинаксовых платах печатных схем по отраженному излучению. Время проведения одного измерения 25 сек. Прибор позволяет измерять толщину медных проводников, имеющих ширину не менее 1,5 мм и длину не менее 3 мм.

23. Радиоизотопный толщиномер ТОР-1. Прибор работает по принципу отражения излучения и предназначен для измерения толщины листовых материалов, стенок труб, различных емкостей при одностороннем доступе.

Электронная схема прибора выполнена на транзисторах. В комплект прибора входят пульт и датчик. Прибор откалиброван на мягкую сталь, но может быть использован для измерения толщины других металлов, при этом точность измерения обеспечивается градуировкой прибора по эталонам потребителя с учетом условий эксплуатации прибора. Прибор работает при температуре от —10 до +40°С при относительной влажности до 98%. Продолжительность одного замера менее 1 мин. Срок работы от одного комплекта батарей (6 шт. «Сагури» 1,6 ФМЦ-У-3,2) не менее 50 ч.

ЛАБОРАТОРИИ И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

§ 1. ДЕФЕКТΟΣКОПИЧЕСКИЕ ЛАБОРАТОРИИ И ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для проведения неразрушающего контроля готовой продукции и изделий на каждом предприятии организуют физическую лабораторию. Лабораторию оснащают соответствующей аппаратурой, подбирают кадры, планируют помещения и оборудуют их необходимой защитой, вентиляцией, отоплением и т. д. в соответствии с требованиями санитарных норм и техники безопасности. Планировка и оснащение дефектоскопической лаборатории определяется видом и объемом работ с учетом размеров исследуемых объектов.

Состав заводской лаборатории должен обеспечивать проведение всего комплекса необходимых исследований материалов и изделий.

В соответствии с этим в нее могут входить различные группы: группы рентгеновской и гамма-дефектоскопии, группа электрофизических методов контроля (ультразвуковой, магнитной, электромагнитной и люминесцентной дефектоскопии) и т. д. В условиях крупного производства, во избежание многочисленных транспортировок готовой продукции, отдельные лаборатории или ее филиалы (группы) располагаются непосредственно в местах производства продукции, подлежащей контролю.

Дефектоскопические лаборатории

Организация дефектоскопической лаборатории. При строительстве нового помещения для лаборатории или переоборудования имеющегося помещения составляется техническое задание. Это задание должно соответствовать требованиям «Санитарных норм проектирования промышленных предприятий № 101—54», «Санитарных правил при промышленной гамма-дефектоскопии» [28]

и «Правил устройства и эксплуатации рентгеновских кабинетов и аппаратов при дефектоскопии» [29]. В техническом задании указываются расчетные значения защиты и материал защиты, излагаются требования, предъявляемые к вентиляции, водопроводу, канализации, отоплению, энергетическому оборудованию и к отделке помещений.

Планировка лаборатории и техническое задание на нее согласуется с отделом капитального строительства и отделом техники безопасности и утверждается главным инженером предприятия или директором.

Планировка помещений, отводимых под рентгеновскую и гамма-дефектоскопию, и техническое задание на них согласуются с городской или районной санитарно-эпидемиологической станцией.

По окончании строительства или ремонта лаборатории приглашается представитель санитарно-эпидемиологической станции для дозиметрического контроля и составления акта. На основании акта санэпидстанция выдает удостоверение на право эксплуатации помещения.

Лаборатория рентгено- и гамма-дефектоскопии [34]. На небольших и средних предприятиях лабораторию рентгено- и гамма-дефектоскопии целесообразно размещать в одном помещении. Под лабораторию отводится отдельное одноэтажное здание или же одноэтажная пристройка. Не допускается оборудовать рентгено- и гамма-дефектоскопические лаборатории в подвальных и полуподвальных помещениях. Лабораторные помещения должны быть сухими, иметь естественное освещение и хорошо вентилироваться. Не рекомендуется размещать дефектоскопические лаборатории в многоэтажных зданиях и, тем более, на верхних этажах, так как в этом случае усложняется защита пола и потолка и возрастает стоимость лабораторий.

В лабораторном здании помещения распределяются таким образом, чтобы съемочные комнаты и другие помещения, в которых производятся работы с источниками ионизирующих излучений, имели как можно меньшую площадь стен и потолков, смежных с помещениями другого назначения. Стены рентгеновской и гамма-дефектоскопической лабораторий, смежные с помещениями, в которых не производятся работы с источниками ионизирующего излучения, оборудуются более мощной

защитой, обеспечивающей снижение мощности дозы излучений до предельно допустимого значения для лиц, не работающих с ионизирующими излучениями.

На рис. 69 приводится типовая планировка дефектоскопической лаборатории общей производственной площадью 300 м². Проект планировки предусматривает следующий порядок работ. Источники излучения поступают в хранилище для хранения в сейфах или колодцах. Для извлечения из контейнеров и перезарядки гамма-аппаратов предусматривается применение манипуляторов М15-А. Управление манипулятором осуществляется из пультовой. Подготовка изделий к просвечиванию происходит в помещении 5 (рис. 69). В этом же помещении при необходимости могут производиться работы по ультразвуковой и магнитной дефектоскопии.

Помещения рентгеновской и гамма-дефектоскопии могут размещаться в пристройке. В этих помещениях размещаются пультсовая, оперативные съемочные камеры с рентгеновскими и гамма-аппаратами, хранилище изотопов, расшифровочная комната и фотокомната.

Пультсовая. В пультсовой располагаются пульта управления рентгеновскими и гамма-аппаратами, управление манипулятором и подъемным механизмом в хранилище изотопов, а также управление защитными дверями съемочных камер и хранилища изотопов. В помещении пультсовой размещаются столы для подготовки деталей к съемке и шкафы для хранения архива рентгенограмм (при отсутствии специального архивного помещения).

Расшифровочная. В расшифровочной комнате расшифровывают рентгенограммы и оформляют результаты рентгеновского и гамма-дефектоскопического контроля. Здесь же подготавливают изделия и образцы к рентгеноструктурному анализу, оформляют и регистрируют результаты анализа.

Фотокомната. В фотокомнате подготавливают рентгеновскую пленку к экспонированию и обрабатывают полученные радиограммы. Для удобства работы и правильной обработки пленки фотокомната условно делится на две половины: «сухой» и «мокрой» обработки пленок. С одной стороны фотокомнаты устанавливают шкафы для хранения фотоматериалов и столы для работы с сухой пленкой. С другой стороны размещаются баки для проявления, закрепления и промывки пленок

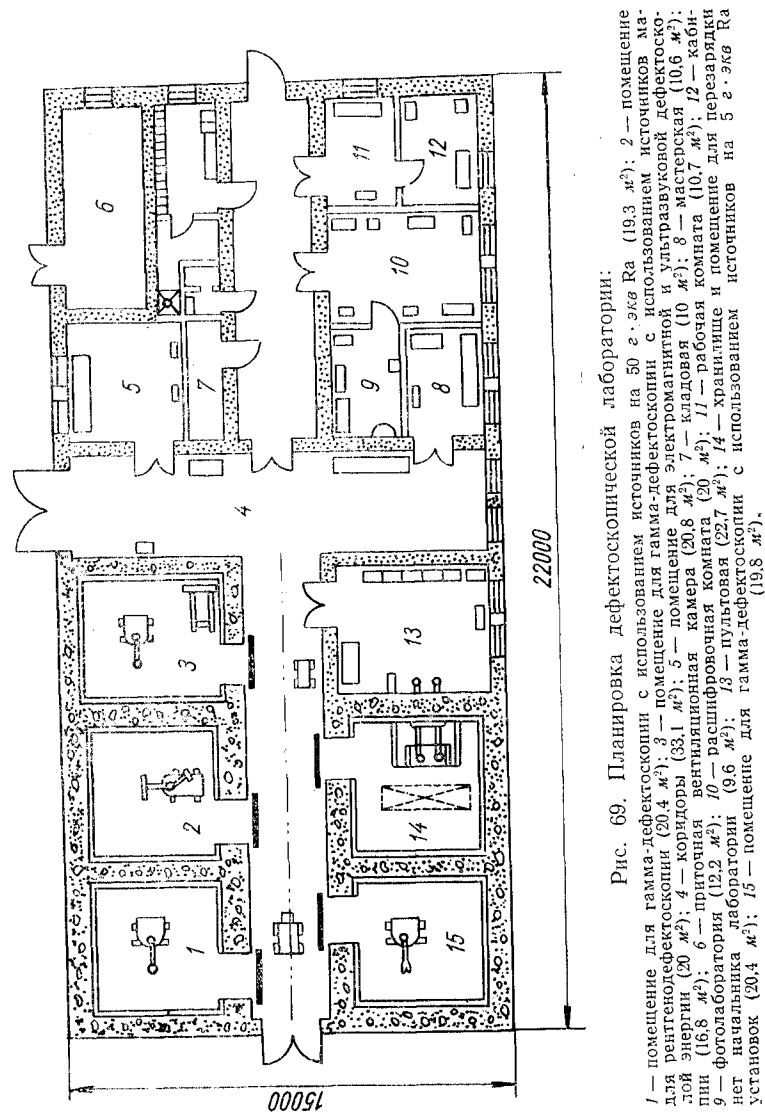


Рис. 69. Планировка дефектоскопической лаборатории:

1 — помещение для гамма-дефектоскопии с использованием источников на 50 г. экв. Ra (19,3 м²); 2 — помещение для рентгенодефектоскопии (20,4 м²); 3 — помещение для гамма-дефектоскопии с использованием источников май энергий (20 м²); 4 — коридоры (33,1 м²); 5 — помещение для электромагнитной и ультразвуковой дефектоскопии (16,8 м²); 6 — приточная вентиляционная камера (20,8 м²); 7 — кладовая (10 м²); 8 — мастерская (10,6 м²); 9 — фотолаборатория (12,2 м²); 10 — расшифровочная комната (20 м²); 11 — рабочая комната (10,7 м²); 12 — кабинет начальника лаборатории (9,6 м²); 13 — пультсовая (22,7 м²); 14 — хранилище и помещение для перезарядки установок (20,4 м²); 15 — помещение для гамма-дефектоскопии с использованием источников на 5 г. экв. Ra (19,8 м²).

и сушильный шкаф. Потребная площадь фотокомнаты определяется количеством обрабатываемых пленок. Примерная планировка фотокомнаты и расположение основного оборудования показаны на рис. 70.

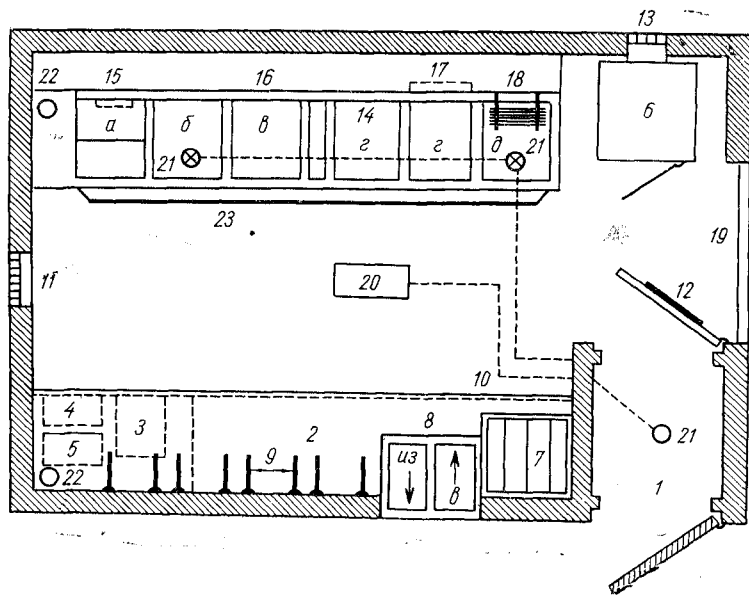


Рис. 70. План фотолаборатории:

1 — тамбур со светонепроницаемыми дверями; 2 — рабочий стол; 3 — ящик для хранения пленок; 4 — светонепроницаемый ящик; 5 — мусорный ящик; 6 — сушильный шкаф; 7 — ящик для хранения кассет; 8 — передаточный ящик; 9 — полка для пленочных подвесок; 10 — подготовительное отделение; 11 — подача воздуха; 12 — светонепроницаемое вентиляционное окно; 13 — выход воздуха из сушильного шкафа; 14 — бак для обработки пленок; а — проявитель; б — бак промежуточной промывки; в — фиксаж; г — каскадная промывка; д — водопроводная раковина; 15 — электрический секундомер; 16 — справочный щит; 17 — осветитель; 18 — полка для сушки подвесок; 19 — светонепроницаемая панель; 20 — фонарь неактивного света; 21 — лампа неактивного света; 22 — отверстие для слива; 23 — резиновый коврик или линолеум.

Съемочные камеры. Съемочные камеры располагают последовательно по степени снижения активности применяющихся источников ионизирующих излучений. Толщину стен съемочных камер рассчитывают таким образом, чтобы мощность дозы в помещениях, смежных со съемочной камерой, не превышала величины, установленной санитарными правилами. В качестве строительного материала при возведении стен съемочных камер чаще всего применяют бетон или кирпич. Для улучше-

ния защитных свойств стены покрывают штукатуркой, содержащей соединения бария — бариты.

Хранилище изотопов. В нерабочем состоянии источники γ -излучения хранят в специально оборудованном помещении — хранилище. Так как в хранилище может находиться одновременно несколько источников γ -излучения, то хранилище по сравнению со съемочными камерами оборудуют дополнительной защитой. Все радиоактивные источники излучения помещают в отдельные контейнеры, тип которых определяется активностью источников. Контейнеры устанавливают в бетонированный колодец, который размещается в центре хранилища и закрывается свинцовыми плитами.

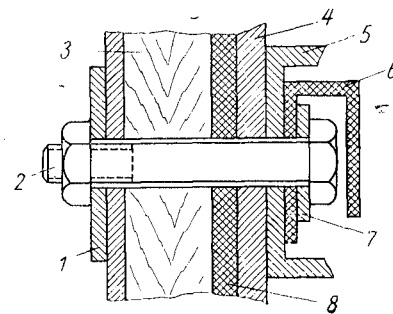


Рис. 71. Закрепление дверных стяжек болтами:

1 — металлическая шайба; 2 — стяжной болт; 3 — многослойная фанера или дерево; 4 — облицовочная фанера; 5 — стягивающий уголок; 6 — блокирующая свинцовая прокладка; 7 — шайба; 8 — защитный слой свинца.

Размеры колодца и толщину защитного слоя бетона устанавливают в соответствии с потребным количеством и активностью источников, находящихся на хранении. Подъем и опускание свинцовых плит и контейнеров осуществляется с помощью специального подъемника — тельфера. Открывание контейнеров, работа с источниками, зарядка и перезарядка гамма-аппаратов производятся с помощью манипулятора из пультовой.

Защитные двери. Дверные проемы съемочных камер и хранилища изотопов оборудуются специальными защитными дверями вагонного типа. Такие двери изготавливают из дерева или фанеры и покрывают листовым свинцом. Толщина листового свинца должна обеспечивать необходимую защиту от излучений. Для крепления листового свинца к двери на ней устанавливают поперечные стяжки. Устройство крепления стяжки к двери показано на рис. 71. Так как в месте сквозного отверстия в свинцовом покрытии защитные свойства двери ослабляются, необходимо применять блокирующие свинцовые прокладки. Двери снабжены пневматическим при-

водом и блокировкой, предотвращающей включение рентгеновских и гамма-аппаратов при открытых дверях.

Если в рентгеновской лаборатории осуществляют визуальный контроль с применением флуороскопических экранов и электронно-оптических преобразователей, в стене съемочной камеры необходимо устроить смотровое окно. Смотровое окно располагают на необходимой высоте и оборудуют по схеме, изображенной на рис. 72.

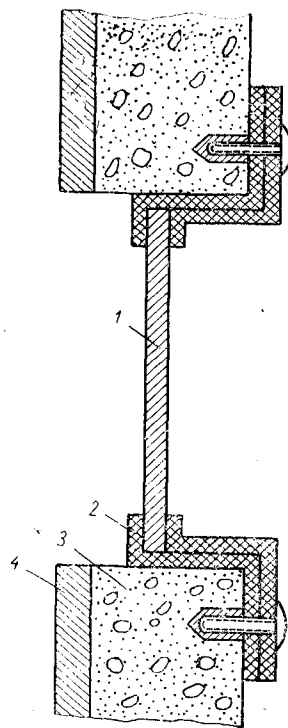


Рис. 72. Смотровое окно в рентгеновской камере:
1 — свинцовое стекло; 2 — свинцовая оправа стекла; 3 — бетонная стена; 4 — баритовая штукатурка.

Мастерская. В составе дефектоскопических лабораторий предусматривается мастерская для подготовки образцов, ремонта аппаратуры и изготовления различных приспособлений для проведения контроля, не выпускаемых промышленностью серийно, но необходимых в данных условиях производства.

Специализированная рентгеновская лаборатория. В случае, когда основным методом контроля массовой продукции является рентгеновский контроль, целесообразно организовать специализированную рентгеновскую лабораторию. Такая лаборатория входит в состав центральной заводской лаборатории, однако территориально размещается непосредственно в цехе, выпускающем продукцию, подлежащую рентгеновскому контролю. Принципы планировки и оборудования

специализированной рентгеновской лаборатории остаются такими же, как и при организации дефектоскопической лаборатории. На рис. 73 показана планировка рентгеновской лаборатории в сварочном цехе машиностроительного завода.

Специализированная гамма-дефектоскопическая лаборатория. В случае, когда основным методом контроля

выбран гамма-дефектоскопический контроль, например в случае контроля серийных литых изделий, целесообразно оборудовать специализированную гамма-дефектоскопическую лабораторию. На рис. 74 приводится планировка такой лаборатории в литейном цехе машиностроительного завода.

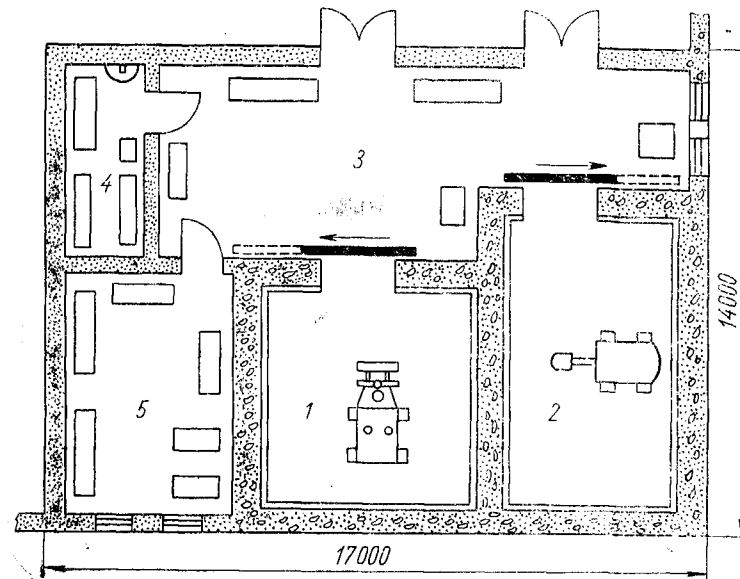


Рис. 73. Рентгеновская лаборатория в сварочном цехе:
1 — камера для съемки аппаратом РУП-150-10-1; 2 — камера для съемки сварных конструкций с большой протяженностью шва; 3 — пультовая; 4 — фотолаборатория; 5 — расшифровочная.

Лабораторное оборудование или оснастку лаборатории составляют аппараты и установки, применяемые в лаборатории, а также различные вспомогательные приспособления и устройства, необходимые для проведения контроля и анализов.

Оснастка специализированных дефектоскопических лабораторий. Специализированные рентгеновские и гамма-дефектоскопические лаборатории оснащаются рентгеновскими установками различной мощности и различного напряжения на трубке или различными гамма-аппаратами с набором радиоактивных источников излучения с различной активностью и энергией излучения.

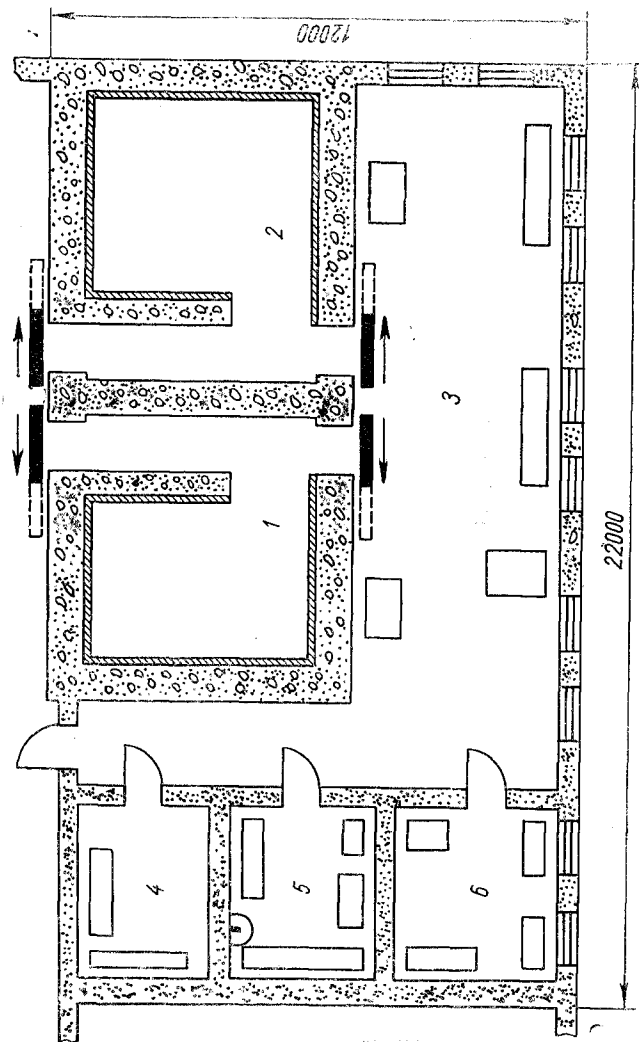


Рис. 74. Гамма-дефектоскопическая лаборатория в литейном цехе:
 1 — камера для съемки аппаратом ГУП-Со-0,5-2; 2 — камера для съемки аппаратом ГУП-Со-5-2; 3 — пульт; 4 — кладовая; 5 — фотолаборатория; 6 — расшифровочная.

Помимо этого в оснастку специализированных дефектоскопических лабораторий входит различное оборудование и приспособления для радиографического метода контроля.

Если в дефектоскопической лаборатории планируется ксерорадиографический, визуальный (флуороскопический) или радиометрический контроль, то лабораторию необходимо дополнительно оснащать соответствующим оборудованием.

Оснастка и приспособления для радиографического метода контроля. Для проведения радиографического метода контроля помимо рентгеновских и гамма-аппаратов необходимы следующее оборудование и приспособления.

1. *Шкаф сушильный* электрический для сушки рентгеновских пленок. Питание от электросети 220 в. Имеется регулятор температуры. Габариты 1718×870×693 мм. Изготавливается Одесским заводом медицинского оборудования.

2. *Баки.* Для обработки рентгенограмм (для проявителя, фиксажа и промежуточной и окончательной промывки пленок) Киевским заводом медицинского оборудования выпускаются баки двух размеров: 740×510×890 мм и 690×465×835 мм.

3. *Негатоскопы.* Портативный негатоскоп типа НС-1. Питание от сети 127 и 220 в, мощность 60 вт. Экран из молочного стекла или оргстекла. Габариты 275×370×365 мм, вес 4,5 кг.

Негатоскоп типа НС-2 с люминесцентными лампами. Габариты 330×348×615 мм, вес 25 кг. Оба негатоскопа выпускаются Киевским заводом медицинского оборудования.

4. *Фонарь* неактивный фотолабораторный. Габариты 365×238×380 мм.

5. *Часы.* Сигнальные часы для проявления типа 108-411. ГОСТ 3145—57, II кл. Выпускаются Орловским часовым заводом.

6. *Электротельфер* для подъема контейнеров и других тяжелых предметов в хранилище изотопов типа ТЭ-0,5. Размеры балки однорельсового пути 14×24 мм, питание от сети 220/380 в.

7. *Манипулятор* шпаговый для перезарядки источников, типа МШ-П-5. Грузоподъемность 5 кг. Длина шпаги 75 см, диаметр 20 мм. Угол сгиба колена 90°, угол по-

ворота шаровой опоры 70°. Вес 32 кг. Поставляет В/О «Изотоп».

8. Светофильтры № 107, 117, 118. Размеры фильтров 9×12, 10×15, 13×18, 18×24, 24×30 см. Изготавливаются Московским заводом технических фотопластинок.

9. Инструментарий для перезарядки источников типа ИД. Поставляет В/О «Изотоп».

10. Свинцовое стекло ТФ-5 $\rho = 4,77 \text{ г/см}^3$.

11. Рамки для обработки рентгеновских пленок в банках (пленочные подвески). Размеры рамок 13×18, 18×24, 24×30, 30×40 мм.

12. Микрофотометр, тип МФ-1 или МФ-2.

§ 2. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ В РАДИАЦИОННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ [10, 30—32]

Работа с высоким напряжением и с источниками ионизирующих излучений представляет реальную опасность при несоблюдении правил техники безопасности. Поэтому работники рентгено- и гамма-дефектоскопических лабораторий не реже одного раза в квартал должны проходить инструктаж по технике безопасности, который регистрируется в специальном журнале.

Защита от тока и высокого напряжения. Конструкция приборов и аппаратов, в которых используется высокое напряжение, предусматривает соответствующую защиту обслуживающего персонала от случайного прикосновения к токонесущим проводникам. Проводники, находящиеся под высоким напряжением, ограждаются. Применяется система сигнализации и блокировки помещений, в которых установлена аппаратура. На рабочем месте (у пультов управления) должны находиться инструкции, содержащие правила работ с рентгеновскими и гамма-аппаратами.

Защита от газов. При работе рентгеновских и гамма-аппаратов происходит ионизация воздуха с образованием вредных для здоровья озона и окислов азота. Поэтому в лабораториях устанавливают вентиляцию с кратностью воздухообмена от шести до десяти.

Защита от огня. Так как в архиве дефектоскопической лаборатории находится большое количество рентгеновской пленки, необходимо соблюдать определенные меры предосторожности (гл. 4). В лабораториях на

видном месте вывешивают инструкцию по пожарной безопасности. В специально отведенном месте устанавливают огнетушители типа ОУ-2 или ОУ-5.

Работа с источниками ионизирующих излучений. При проведении работ с использованием рентгеновского излучения необходимо строго соблюдать «Правила устройства и эксплуатации рентгеновских кабинетов и аппаратов при дефектоскопии» № 366—61. Безопасность работ по гамма-дефектоскопии обеспечивается строгим соблюдением «Санитарных правил при промышленной гамма-дефектоскопии» № 484-63.

Предельно допустимая доза облучения ПДД. Работники рентгено- и гамма-дефектоскопических лабораторий делятся на категории А и Б. Категория А — лица, непосредственно работающие с источниками ионизирующих излучений, категория Б — лица, работающие в смежных помещениях и санитарно-защитных зонах, не связанные с работой с источниками ионизирующих излучений.

Для категории А предельно допустимая доза облучения составляет 0,1 р в неделю. Для категории Б установлена предельно допустимая доза облучения в десять раз меньше — 0,01 р в неделю. Целью защиты от ионизирующего излучения является понижение мощности дозы излучения, создаваемой рентгеновским или гамма-аппаратом, до предельно допустимой величины облучения для лиц соответствующих категорий.

Защита экранированием. Наиболее распространенным способом защиты от ионизирующих излучений является ослабление их слоем тяжелого материала — экраном. При прохождении излучения через экран кванты либо поглощаются в нем, либо теряют свою энергию, вследствие чего мощность дозы за экраном меньше, чем мощность дозы в том же месте без экрана. Защитные свойства экранов характеризуются кратностью ослабления и зависят от материала экрана и энергии излучения.

Кратность ослабления. Кратностью ослабления называют отношение мощности дозы без экрана к мощности дозы в том же месте с экраном

$$K = \frac{P_0}{P},$$

где K — кратность ослабления; P_0 — мощность дозы без экрана; P — мощность дозы с экраном.

Необходимая кратность ослабления экрана вычисляется по этой формуле путем деления мощности дозы, создаваемой установкой, на величину предельно допустимой дозы облучения.

Защитные материалы. Часто в качестве защитного материала используют свинец, однако во многих случаях его можно заменить более дешевыми материалами.

1. **Свинец** ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$) применяется для изготовления защитных тубусов установок, защитных контейнеров для хранения изотопов, для защитных дверей при использовании излучений с энергией менее 1 Мэв, защитных экранов и коллиматоров. Свинец применяется в виде листов или полос, а также в виде блоков.

2. **Свинцовое стекло** ($\rho = 3,4\text{—}4,6 \text{ г/см}^3$) применяется для устройства защитных окон при рентгеноскопии. Стекла имеют толщину 10 и 20 мм и размеры 18×30 ; 24×30 ; 30×40 ; $40 \times 50 \text{ см}$.

3. **Свинцовая резина** ($\rho = 3,3\text{—}5,8 \text{ г/см}^3$) при толщине около 3 мм эквивалентна по защитным свойствам 1 мм свинца.

4. **Вольфрам** ($\rho = 18,7 \text{ г/см}^3$) применяется для изготовления защитных контейнеров и радиационных головок гамма-аппаратов при использовании источников с большой энергией излучения.

5. **Железо** ($\rho = 7,86 \text{ г/см}^3$) применяется для устройства внешних слоев защитных контейнеров, защиты пола при постоянно направленном вниз пучке излучения, для устройства защиты проемов дверей и т. д. Применяется также в виде блоков.

6. **Барит** (минерал с высоким содержанием BaSO_4) применяется в виде баритовой штукатурки или баритобетона. По окружности зерна различают: а) барит пылевидный ($\rho = 2 \text{ г/см}^3$); б) барит кусковой ($\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$); в) барит песковой ($\rho = 2,4 \text{ г/см}^3$).

Определить необходимую толщину защиты из некоторых материалов по известной кратности ослабления можно с помощью таблиц, приводимых в литературе [31—33].

Пример. Рассчитать толщину защиты из свинца для безопасной работы с источником ^{60}Co с гамма-эквивалентом 83 мк-экв Ra на расстоянии 0,5 м в течение 36 ч в неделю.

Решение. 1. Мощность экспозиционной дозы при данных условиях

$$P = \frac{M \cdot 8,4 \cdot 10^3}{R^2} = \frac{83 \cdot 8,4 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 10^3} = 278 \text{ мр/ч.}$$

2. Допустимая мощность экспозиционной дозы

$$P_{\text{пду}} = \frac{100}{t} = \frac{100}{36} = 2,8 \text{ мр/ч.}$$

Кратность ослабления

$$K = \frac{P}{P_{\text{пду}}} = \frac{278}{2,8} \approx 100.$$

По таблицам для энергии ^{60}Co ($h\nu = 1,25 \text{ Мэв}$) находим, что толщина свинцовой защиты должна быть 8,45 см.

Защита временем. В некоторых случаях экранированием не удастся снизить мощность дозы излучения на рабочем месте до предельно допустимой, например при флуороскопии. В этом случае необходимо применить защиту временем, т. е. сократить время пребывания в этом месте. Если известна мощность дозы излучения P (в мр/ч), то предельно допустимое время облучения в течение недели для лиц категории А можно вычислить по формуле:

$$t_{\text{макс}} = \frac{100}{P} \text{ ч.}$$

Защита расстоянием. Если экранированием и сокращением времени работы не удастся понизить мощность дозы излучения до предельно допустимой, тогда необходимо удалить рабочее место на безопасное расстояние.

Защита от рассеянного излучения. Помимо защиты от прямого пучка излучений в некоторых случаях приходится сооружать защиту также и от рассеянного излучения. Необходимо помнить, что источником рассеянного излучения становятся все предметы, на которые попадает прямой пучок излучений (стены, потолок, столы и другие предметы), вследствие чего мощность дозы, создаваемая рассеянным излучением, на рабочем месте зависит от взаимного положения источника излучения и окружающих предметов. Поэтому рекомендуется периодически производить на рабочем месте дозиметрический контроль.

Дозиметрический контроль. Безопасность проведения работ в радиационной дефектоскопии в значительной степени зависит от правильной организации и своевременного контроля условий работы [33]. Целью дозиметрического контроля является проверка надежности защиты и измерение дозы излучения, получаемой работниками дефектоскопических лабораторий. Величина доз

и мощность доз излучений измеряется специальными приборами: дозиметрами, рентгенометрами, радиометрами и т. д. По назначению эти приборы подразделяют на две группы: приборы для индивидуального дозиметрического контроля и приборы для измерения мощности доз излучения.

Приборы индивидуального контроля применяют для измерения суммарной дозы облучения, получаемой ра-

ботником в течение рабочего дня или рабочей недели. В конце рабочего дня или недели измеряют дозу, накопленную индивидуальным дозиметром работника, и регистрируют ее в специальном журнале. Основные характеристики дозиметрических приборов приводятся в табл. 34.

Дозиметрический контроль осуществляется в трех направлениях. Во-первых, стационарный контроль радиационного фона осуществляется дозиметрическим сигнализатором СД-1М. Во-вторых, периодический контроль за распределением радиационного фона во всех помещениях лаборатории с помощью переносных рентгенометров ПМР-1; МРМ-1 и др. В-третьих, индивидуальный дозиметрический контроль за суммарной дозой облучения каждого работающего в лаборатории с помощью индивидуальных дозиметров КИД-1, ДК-0,2, ИДК-4.

Таблица 34

Характеристики дозиметрических приборов

Наименование прибора	Тип датчика	Диапазон энергии излучения, в котором рекомендуется применять прибор, Мэв	Диапазон значений измеряемой дозы или мощность дозы
----------------------	-------------	---	---

Приборы, измеряющие дозу

Индивидуальный дозиметр ДК-0,2	Ионизационная камера	0,2 ÷ 2,0	20 ÷ 200 мр
Индивидуальный дозиметр КИД-1	То же	0,1 ÷ 2,0	20 ÷ 2000 мр
Индивидуальный дозиметр ИДК-4	»	0,03 ÷ 1,5	До 50 р
Медицинский рентгенометр МР-1-М	»	0,012 ÷ 2,0	1 мр ÷ 5 · 10 ⁴ р
Индивидуальный люминесцентный дозиметр ИЛК-3	Светосостав	До 2,0	20 мр ÷ 2 · 10 ³ р

Приборы, измеряющие мощность дозы

Рентгенометр повышенной точности РП-1	Ионизационная камера	0,06 ÷ 2,5	0,3 ÷ 30000 мр/ч
Стационарный дозиметр «Кактус»	То же	0,2 ÷ 2,5	0,5 ÷ 72000 мр/ч
Микрорентгенометр МРМ-1	»	0,08 ÷ 2,0	1 ÷ 3600 мр/ч
Микрорентгенометр ПМР-1	»	0,2 ÷ 2,0	2 ÷ 18000 мр/ч
Карманный радиометр РК-01	Газоразрядные счетчики	0,2 ÷ 2,0	0,5 ÷ 3600 мр/ч
Предупреждающий дозиметр «Щелкун»	То же	0,2 ÷ 2,0	0,005—20000 мр/ч
Радиометр ДП-11-Б	»	0,2 ÷ 2,0	0,03 ÷ 20 мр/ч
Радиометр СРП-2 «Кристалл»	Сцинтилляционный кристалл	0,05 ÷ 2,0	0,002 ÷ 9000 мр/ч

Линейные (μ , см^{-1}), массовые ($\frac{\mu}{\rho}$, $\frac{\text{см}^2}{\text{г}}$) коэффициенты ослабления
и слой половинного ослабления ($\delta_{1/2}$, см) различных элементов в зависимости от энергии излучения

Энергия излучения, Мэв	Углерод			Натрий			Магний			Алюминий		
	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$
0,01	5,06	2,28	0,14	15,5	16,0	0,05	37,8	21,7	0,02	72,4	26,8	0,01
0,02	0,952	0,429	0,73	2,0	2,06	0,35	4,82	2,77	0,14	9,40	3,48	0,07
0,03	0,559	0,252	1,24	0,686	0,707	1,01	1,62	0,929	0,43	3,05	1,13	0,27
0,04	0,455	0,205	1,52	0,374	0,385	1,85	0,829	0,476	0,84	1,50	0,556	0,46
0,05	0,413	0,186	1,68	0,264	0,272	2,63	0,561	0,322	1,24	0,964	0,357	0,72
0,06	0,389	0,175	1,78	0,218	0,225	3,18	0,440	0,253	1,58	0,729	0,270	0,95
0,08	0,360	0,162	1,93	0,174	0,179	3,98	0,336	0,193	2,06	0,540	0,200	1,28
0,1	0,340	0,153	2,04	0,152	0,157	4,56	0,292	0,168	2,34	0,459	0,170	1,51
0,2	0,273	0,123	2,54	0,117	0,120	5,93	0,216	0,124	3,25	0,329	0,122	2,11
0,3	0,238	0,107	2,91	0,100	0,103	6,93	0,186	0,107	3,73	0,281	0,104	2,47
0,4	0,212	0,095	3,27	0,089	0,092	7,79	0,165	0,095	4,20	0,250	0,093	2,77
0,5	0,194	0,087	3,57	0,081	0,084	8,55	0,150	0,086	4,62	0,228	0,084	3,04
0,6	0,179	0,081	3,87	0,075	0,077	9,24	0,139	0,080	4,98	0,210	0,078	3,30
0,8	0,157	0,071	4,41	0,066	0,068	10,50	0,122	0,070	5,78	0,184	0,068	3,77
1,0	0,141	0,064	4,92	0,059	0,061	11,75	0,109	0,063	6,36	0,166	0,061	4,18
2,0	0,099	0,044	7,00	0,042	0,043	16,50	0,077	0,044	9,00	0,116	0,043	5,98
3,0	0,079	0,036	8,79	0,034	0,035	20,19	0,063	0,036	11,00	0,096	0,036	7,22
4,0	0,068	0,031	10,20	0,030	0,031	23,15	0,055	0,032	12,63	0,084	0,031	8,25
5,0	0,060	0,027	11,56	0,027	0,028	26,70	0,050	0,029	13,87	0,077	0,028	9,00
6,0	0,055	0,025	12,61	0,025	0,026	27,70	0,047	0,027	14,76	0,072	0,027	9,60
8,0	0,048	0,021	14,45	0,022	0,023	31,60	0,042	0,024	16,51	0,066	0,024	10,50
10,0	0,043	0,020	16,12	0,021	0,022	33,00	0,040	0,023	17,34	0,062	0,023	11,15
15,0	0,038	0,017	18,26	0,020	0,021	34,70	0,037	0,022	18,73	0,059	0,022	11,74
20,0	0,035	0,016	19,79	0,019	0,020	36,50	0,037	0,021	18,73	0,058	0,021	11,91
30,0	0,032	0,015	21,65	0,019	0,019	36,50	0,037	0,021	18,73	0,059	0,022	11,74

Продолжение прилож. 1

Энергия излучения, Мэв	Кобальт			Кальций			Титан			Ванадий			Хром		
	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$
0,01	81,1	34,5	0,01	149,0	96,9	0,00	527,0	116,0	0,00	763,0	128,0	0,00	1050,0	146,0	—
0,02	10,6	4,53	0,07	20,6	13,4	0,03	73,5	16,2	0,01	108,0	18,1	0,01	151,0	21,0	0,00
0,03	3,38	1,44	0,21	6,44	4,18	0,11	22,9	5,04	0,03	33,7	5,65	0,02	47,0	6,54	0,01
0,04	1,62	0,691	0,43	2,80	1,82	0,25	10,0	2,21	0,07	14,7	2,46	0,05	20,5	2,85	0,03
0,05	1,00	0,427	0,69	1,54	0,998	0,45	5,40	1,19	0,13	7,87	1,32	0,09	11,0	1,53	0,06
0,06	0,740	0,315	0,94	0,998	0,648	0,69	3,44	0,76	0,20	4,98	0,836	0,14	6,86	0,954	0,10
0,08	0,519	0,221	1,34	0,553	0,359	1,27	1,82	0,401	0,38	2,58	0,435	0,27	3,49	0,486	0,20
0,1	0,428	0,182	1,62	0,399	0,259	1,74	1,24	0,273	0,56	1,72	0,289	0,40	2,29	0,318	0,30
0,2	0,298	0,127	2,32	0,211	0,137	3,28	0,595	0,131	1,16	0,781	0,131	0,89	0,992	0,138	0,70
0,3	0,254	0,108	2,73	0,172	0,112	4,02	0,472	0,104	1,47	0,614	0,103	1,13	0,769	0,107	0,92
0,4	0,226	0,096	3,07	0,151	0,098	4,59	0,412	0,091	1,68	0,534	0,090	1,30	0,662	0,092	1,05
0,5	0,205	0,087	3,38	0,136	0,089	5,09	0,371	0,082	1,87	0,481	0,081	1,44	0,595	0,083	1,16
0,6	0,189	0,080	3,66	0,125	0,081	5,55	0,342	0,075	2,03	0,442	0,074	1,57	0,545	0,076	1,27
0,8	0,166	0,071	4,18	0,109	0,071	6,36	0,297	0,066	2,34	0,386	0,065	1,79	0,475	0,066	1,45
1,0	0,149	0,064	4,65	0,098	0,064	7,08	0,266	0,059	2,61	0,346	0,058	2,00	0,426	0,059	1,63

Энергия излучения, Мэв	Молибден			Олово			Барий		
	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$
0,02	K 846,0	K 82,9	—	—	—	—	—	—	—
0,029	—	—	—	44,5	6,09	0,02	—	—	—
0,029	—	—	—	K 323,0	K 44,3	—	—	—	—
0,03	288,0	28,2	—	307,0	42,1	—	29,5	7,81	0,02
0,038	—	—	—	—	—	—	16,3	4,31	0,04
0,038	—	—	—	—	—	—	K 114,0	K 30,1	0,00
0,04	130,0	12,7	—	141,0	19,3	0,00	93,4	24,7	0,01
0,05	69,9	6,85	0,01	76,7	10,5	0,01	51,8	13,7	0,01
0,06	42,7	4,19	0,02	47,5	6,50	0,01	31,8	8,42	0,02
0,08	19,9	1,95	0,04	21,8	2,98	0,03	14,5	3,84	0,05
0,1	11,1	1,09	0,06	12,0	1,65	0,06	8,16	2,16	0,09
0,2	2,47	0,242	0,28	2,37	0,324	0,29	1,51	0,400	0,46
0,3	1,41	0,138	0,49	1,19	0,163	0,58	0,703	0,186	0,99
0,4	1,06	0,104	0,65	0,840	0,115	0,82	0,469	0,124	1,48
0,5	0,897	0,088	0,77	0,675	0,092	1,02	0,366	0,097	1,90
0,6	0,795	0,078	0,87	0,582	0,080	1,19	0,312	0,083	2,22
0,8	0,672	0,066	1,03	0,482	0,066	1,44	0,252	0,067	2,75
1,0	0,592	0,058	1,17	0,419	0,057	1,65	0,219	0,058	3,16

2,0	0,422	0,041	1,64	0,299	0,041	2,32	0,153	0,041	4,52
3,0	0,372	0,037	1,86	0,268	0,037	2,58	0,139	0,037	4,99
4,0	0,357	0,035	1,94	0,260	0,036	2,76	0,136	0,036	5,10
5,0	0,352	0,035	1,97	0,260	0,036	2,76	0,138	0,037	5,02
6,0	0,351	0,034	1,97	0,262	0,036	2,64	0,139	0,037	4,98
8,0	0,358	0,035	1,94	0,272	0,037	2,55	0,146	0,039	4,75
10,0	0,367	0,036	1,89	0,283	0,039	2,45	0,152	0,040	4,56
15,0	0,402	0,039	1,72	0,313	0,043	2,21	0,169	0,045	4,10
20,0	0,432	0,042	1,61	0,339	0,046	2,04	0,186	0,049	3,73
30,0	0,479	0,047	1,45	0,382	0,052	1,82	0,209	0,055	3,32

Энергия излучения, Мэв	Тантал			Вольфрам			Свинец		
	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/1}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$
0,02	873,0	52,6	—	1020,0	54,4	—	818,0	72,1	—
0,03	282,0	17,0	—	331,0	17,7	—	266,0	23,5	—
0,04	130,0	7,86	—	151,0	8,09	—	119,0	10,5	0,01
0,05	71,4	4,30	0,01	82,1	4,39	0,01	65,0	5,73	0,01
0,06	43,0	2,59	0,02	50,1	2,68	0,01	40,3	3,55	0,02
0,068	31,2	1,88	0,02	—	—	—	—	—	—
0,068	K 193,0	K 11,6	—	—	—	—	—	—	—
0,070	—	—	—	34,2	1,83	0,02	—	—	—
0,070	—	—	—	K 206,0	K 11,0	0,00	—	—	—
0,080	124,0	7,46	0,01	144,0	7,70	0,01	18,8	1,66	0,01

Энергия излучения, Мэв	Тантал			Вольфрам			Свинец		
	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$	μ	$\frac{\mu}{\rho}$	$\delta_{1/2}$
0,088	—	—	—	—	—	—	14,7	1,30	0,05
0,088	69,7	4,20	0,01	81,5	4,36	0,01	K 86,4	K 7,62	0,01
0,1	12,2	0,733	0,06	14,0	0,747	0,05	—	5,47	0,01
0,2	5,01	0,302	0,14	5,80	0,310	0,12	—	0,942	0,06
0,3	—	—	—	—	—	—	—	0,378	0,16
0,4	3,02	0,182	0,23	3,44	0,184	0,20	—	0,220	0,28
0,5	2,16	0,130	0,32	2,45	0,131	0,28	—	0,152	0,40
0,6	1,73	0,104	0,40	1,96	0,105	0,35	—	0,120	0,51
0,8	1,30	0,078	0,53	1,48	0,079	0,47	—	0,983	0,70
1,0	1,08	0,065	0,64	1,22	0,066	0,57	—	0,070	0,87
2,0	0,730	0,044	0,95	0,821	0,044	0,84	—	0,046	1,32
3,0	0,674	0,041	1,03	0,767	0,041	0,91	—	0,043	1,44
4,0	0,674	0,041	1,03	0,759	0,041	0,91	—	0,043	1,43
5,0	0,691	0,042	1,00	0,778	0,042	0,89	—	0,044	1,40
6,0	0,702	0,042	0,99	0,797	0,043	0,87	—	0,045	1,37
8,0	0,740	0,045	0,94	0,810	0,045	0,82	—	0,047	1,29
10,0	0,785	0,047	0,88	0,894	0,048	0,78	—	0,050	1,22
15,0	0,890	0,054	0,78	1,00	0,054	0,69	—	0,057	1,08
20,0	0,979	0,059	0,71	1,10	0,059	0,63	—	0,063	0,98
30,0	1,11	0,067	0,62	1,26	0,067	0,55	—	0,071	0,85

* Буква K, стоящая рядом со значением коэффициента ослабления излучения, указывает на границу K-полосы поглощения.

Плотность ρ , порядковые номера Z и атомные числа A некоторых элементов

Элемент	Порядковый номер Z	Атомное число A	Плотность ρ , г/см ³	Элемент	Порядковый номер Z	Атомное число A	Плотность ρ , г/см ³
Бериллий	4	9,01	1,82	Медь	29	63,54	8,90
Углерод	6	12,01	2,22	Цинк	30	65,38	7,13
Натрий	11	22,99	0,97	Германий	32	72,60	5,36
Магний	12	24,32	1,74	Селен	34	78,96	4,81
Алюминий	13	26,98	2,70	Цирконий	40	91,22	6,53
Кремний	14	28,09	2,35	Ниобий	41	92,91	8,57
Кальций	20	40,08	1,54	Молибден	42	95,95	10,20
Титан	22	47,90	4,54	Олово	48	112,41	8,65
Ванадий	23	50,95	5,96	Цезий	55	132,91	1,87
Хром	24	52,01	7,19	Барий	55	137,36	3,78
Марганец	25	54,93	7,43	Тулий	69	169,4	9,35
Железо	26	55,85	7,87	Тантал	73	180,88	16,6
Кобальт	27	58,94	8,90	Вольфрам	74	183,92	18,7
Никель	28	58,69	8,85	Свинец	82	207,21	11,34

Порядок заказа радиоактивных источников

Оформление заявок на радиоактивные источники излучения производится в соответствии с информационными письмами Всесоюзного объединения «Изотоп» о порядке заказа радионуклидной продукции.

Информационные письма содержат справочные данные о новой радионуклидной продукции и другие сведения, связанные с приобретением радиоактивных источников излучения. По просьбе потребителей информации по этим вопросам высылаются Всесоюзным объединением «Изотоп».

Согласно действующим правилам, в заявку на источники γ -излучения входит:

1. Заявка на источник с разрешением санинспекции — 3 экз.
1. Реквизитный лист — 4 экз.

Форма бланков заявки и реквизитного листа приводятся ниже. Все заказы, заявки и переписка по вопросам поставки радиоактивных источников излучения направляются в соответствующую территориальную контору Всесоюзного объединения «Изотоп».

Зарядку и перезарядку гамма-установок желательно организовать на месте, применяя специальные защитные и перезарядные средства. По заказам организаций (предприятий) зарядку и перезарядку гамма-установок может производить Специализированное управление по монтажу и наладке радиационной техники.

Заявка на источники альфа-, бета- и гамма- излучений

ЗАКАЗ-ЗАЯВКА

на поставку источников излучения, рабочих и образцовых излучателей на _____ год от _____
(регистрационный № _____)

(наименование организаций)

№ пп	Источник	Активность по каталогу	Всего на год, шт.	В том числе по месяцам												Цена	Сумма	Примечание
				I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Итого																		

Примечание. Указать геометрические размеры источника.

Оплату гарантируем с нашего расчетного счета _____

_____ в _____ отд. Госбанка г. _____

М. П. Подпись руководителя организации _____
(фамилия, инициалы) разборчивоМ. П. Подпись главного бухгалтера _____
(фамилия, инициалы) разборчиво«Разрешаю» Госсанинспектор _____
(фамилия, инициалы) разборчиво

РЕКВИЗИТНЫЙ ЛИСТ

1. Наименование организации _____ (получитель)

(регистрационный №)

2. Адрес _____ Телефон _____

Почтовый _____

Телеграфный _____

Адрес для доставки продукции _____

(указать все виды транспортных документов: название ж.-д. станции, аэропорта, водного порта и т. д.)

3. Фамилия, имя, отчество, должность лиц, ответственных за приемку и хранение изотопов _____

4. Образец печати для оформления приемки _____

5. Образец подписи ответственного за приемку и хранение изотопов _____

6. Часы работы учреждения _____
Часы обеденного перерыва _____

7. Платильщик — его наименование, реквизиты, расчетный счет _____

8. Наименование банка _____ в гор. _____

«_____» _____ 196_ г.

Примечание. Организация, финансирующаяся в стройбанке, дополнительно предоставляет справку о финансировании оплаты изотопов либо визирует заявку в стройбанке (п. 13 Положения о поставке продукции промышленно-технического назначения.)

Подпись руководителя организации _____ (фамилия, инициалы) разборчиво

Подпись главного бухгалтера _____

(фамилия, инициалы) разборчиво

ЛИТЕРАТУРА

1. Неразрушающие испытания. Справочник. Т. I. Перев. с англ. под ред. А. С. Боровикова и др. «Энергия», 1965.
2. Китайгородский А. И. Введение в физику. Физматгиз, 1959.
3. Корсунский М. И. Оптика. Строение атома. Атомное ядро. М., «Наука», 1964.
4. Шпольский Э. В. Атомная физика. Т. I, М., Физматгиз, 1963.
5. Бурдун Г. Д. и др. Международная система единиц. М., «Высшая школа», 1964.
6. Прайс В. Регистрация ядерного излучения. Перев. с англ., М., Изд-во иностр. лит., 1960.
7. Калашникова В. И., Козодаев М. С. Детекторы элементарных частиц. М., «Наука», 1966.
8. Гусев Н. Г. и др. Радиоактивные изотопы как гамма-излучатели. М., Атомиздат, 1964.
9. Изотопы, источники излучений и радиоактивные материалы. Каталог. М., Госатомиздат, 1962.
10. Румянцев С. В. Радиационная дефектоскопия. М., Атомиздат, 1968.
11. Информационное письмо по изотопам о порядке заказа радиоизотопной продукции на 1966 г. Атомиздат. Отдел технической информации в/о «Изотоп». М., 1965.
12. Хараджа Н. Ф. Курс рентгенотехники. Л., «Энергия», 1966.
13. Соколов В. С. Дефектоскопия материалов. М., Госэнергоиздат, 1961.
14. Шмелев В. К. Рентгеновские аппараты. М., Госэнергоиздат, 1957.
15. Воробьев А. А. и др. Бетатронная дефектоскопия материалов и изделий. М., Атомиздат, 1965.
16. Радиационная техника. Вып. I, II. М., Атомиздат, 1967, 1968.
17. Балазовский М. Я. Рентгеновские пленки и их обработка. М., Машгиз, 1964.
18. Трапезников А. К. Рентгенодефектоскопия. М., Машгиз, 1948.
19. Гайдовский В. И. Исследование материалов рентгеновскими и γ -лучами. М., Металлургиздат, 1959.
20. Промышленная радиография. Перев. с англ. М., Атомиздат, 1960.
21. Корнишин К. И. Ксерорадиографический метод получения изображения при рентгеновской дефектоскопии. Фил. ВИНТИ, 1959.
22. Дюран Р. Л. Промышленная ксерорадиография. Перев. с англ. М., Атомиздат, 1960.
23. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий. Сборник статей. Под ред. проф. С. Т. Назарова. ОНТИприбор, 1964.
24. Назаров С. Т. «Заводск. лаборатория», № 11 (1960).
25. Ивахненко И. С. Метод и аппаратура сцинтилляционной дефектоскопии. Труды ЦНИИТМаш, вып. 33, 1962.
26. Таточенко А. К. Радиоактивные изотопы в приборостроении. М., Атомиздат, 1960.
27. Штейн Н. И. Применение радиоактивных излучений в измерительной технике. М., Машгиз, 1960.
28. Санитарные правила при промышленной гамма-дефектоскопии № 448—63. Минздравиздат, 1963.
29. Правила устройства и эксплуатации рентгеновских кабинетов и аппаратов при дефектоскопии № 366—61. Минздравиздат, 1961.
30. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и с источниками ионизирующих излучений № 330—60. М., Атомиздат, 1960.
31. Моисеев А. А., Иванов В. И. Краткий справочник по радиационной защите и дозиметрии. М., Атомиздат, 1964.
32. Кимель Л. Р., Машкович В. П. Защита от ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1966.
33. Голубев Б. П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М., Госэнергоиздат, 1963.
34. Сулькин А. Г. Гамма-дефектоскопы для промышленной радиографии. М., изд-во «Информстандартэлектро». М., 1967.

Таблица сравнения методов неразрушающего контроля магнитных металлов [1]

Дефекто-склония	Основные методы неразрушающего контроля	Виды дефектов в магнитных металлах																																				
		Общие виды дефектов			Листы и плиты		Подсосы и трещины		Оглевки			Покоски		Сварные швы			Исто-тов-ление	Эксплуатация																				
Радиацион-ная (4)	Рентгенография Рентгеноскопия (1) Радиография	Поверхностные микротрещины	Поверхностные трещины	Внутренние трещины	Внутренние пустоты	Отклонения по толщине	Металлургические дефекты	Отклонения по толщине	Раскол	Отверстия	Швы	Усадочные раковины	Продольные надрывы	Включения	Рубцы	Поверхностные трещины	Внутренние усадочные трещины	Пористость	Смещение ядра	Закаты, заковы	Включения	Внутренние разрывы	Внутренние флокены	Трещины и разрывы	Усадочные трещины	Шлаковые включения	Непровар	Пористость	Отсутствие проплавления	Закалочные трещины	Шлифовочные трещины	Усталостные трещины	Коррозия от перенапряжения	Томление	Утонение	Точечная коррозия		
				02	02	0	+	0	0	0	+	+	+	0	+	0	02	+	+	+	0	0	0	+	0	02	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Контактный эхо-метод	+	+	+	+	0	0	0	+	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Иммерсионный эхо-метод	0	0	+	+	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Теневого метода Резонансный метод Метод собственной частоты	—	0	+	+	0	0	+	+	+	0	+	0	0	—	0	0	+	+	+	+	+	—	0	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Магнитно-порошковая	Переменный ток, мокрый метод Переменный ток, сухой метод Постоянный ток, мокрый метод Постоянный ток, сухой метод	+	+	+	+	0	0	0	0	+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Электро-магнитная	Вихревые токи Магнитное поле Поле рассеяния (феррозондовый метод) Метод проводимости на постоянном токе	0	0	0	0	—	—	—	—	0	0	0	—	—	—	0	0	0	—	—	—	—	—	—	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Люминесцентная (цветная) (5)	Метод проникающих красителей Метод люминесцентных жидкостей Метод флюидгидролизиса частиц	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. 1 — флуороскопия, только для тонких сечений; 2 — метод может быть «хорошим», если изучение напряжено параллельно трещине; 3 — имеются специальные «таблица» толщин; 4 — размер обнаруженного дефекта зависит от толщины изделия; 5 — проникающими жидкостями обнаруживаются дефекты, имеющие выход к поверхности; + — хороший метод; 0 — средний метод; — — плохой метод; □ — неточный метод.

Таблица сравнения методов неразрушающего контроля немагнитных металлов [1]

Дефекто-скопия	Основные методы неразрушающего контроля		Виды дефектов в немагнитных металлах																					
	Общие виды дефектов	Листы и плиты	Полосы и трубы	Отливки	Поковки	Сварные швы	Като-точные лике	Эксплуатация	Другие материалы и испытания															
Радиацион-ная (4)	Рентгенография Рентгеноскопия (1) Гаммаграфия	Поверхностные микротрещины	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
		Поверхностные трещины	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
Ультра-звуковая и звуковая	Контактный эхо-метод Иммерсион-ный эхо-метод	Внутренние трещины	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Внутренние пустоты	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Магнитно-порошковая	Рентгенографические методы Метод собственной частоты	Отклонения по толщине	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Металлургические дефекты	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Электро-магнитная	Теневой метод Резонансный метод Метод повышенной частоты	Отклонения по толщине	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Расслоя	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Люминес-центная (цветная) (5)	Вихревые токи Магнитное поле Поле рассеяния (феррозондовый метод) Метод проводимости на постоянном токе	Отверстия	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Усадочные раковины	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Продольные надрывы	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Включения	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Рубцы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Поверхностные трещины	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
		Внутренние усадочные трещины	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Пористость	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Смещение ядра	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Закаты, заковы	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Включения	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Внутренние разрывы	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Внутренние флокены	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Трещины и разрывы	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
		Усадочные трещины	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Шлаковые включения	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Непровар	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Пористость	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Отсутствие проплавления	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Закалочные трещины	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Шлифовочные трещины	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Усталостные трещины	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02	02
		Коррозия от перенапряжения	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Томление	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Утонение	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Точечная коррозия	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Пластики	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Внутренние узлы конструкций	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
		Толщина покрытий	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Нарушение соединений	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++

Примечание. 1 — флуорескопия. Легких металлов качественной флуорескопии тяжелых металлов (табл. 1); 2 — метод может быть «хорошим», если изучение паппадыено паппадыено трещины; 3 — имеются специальные эталоны толщин; 4 — размер обнаруженного дефекта зависит от толщины изделия; 5 — методом проникающих жидкостей обнаруживаются дефекты, имеющие выход на поверхность; ++ — хороший метод; 0 — средний метод; — — плохой метод; □ — неподходящий метод.