

Лекция 27

РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Радиационные методы занимают одно из ведущих мест среди неразрушающих методов контроля после акустических и магнитных методов. Этому способствовал огромный научно-технический потенциал, сформированный в процессе решения ядерно-энергетической проблемы в конце 40-х – начале 50-х годов прошлого столетия. Эта крупномасштабная проблема обусловила развитие электрофизических установок различного назначения, экспериментальных методов ядерной физики, включая детекторы ионизирующего излучения и устройств обработки и отображения информации.

Привлекательным в радиационных методах НК является удобство анализа внутренней структуры объекта контроля, визуально воспринимаемой в виде изображения.

Суть радиационных методов заключается в следующем.

Радиационные методы основаны на взаимодействии ионизирующих излучений с контролируемым объектом. При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется — поглощается и рассеивается. Степень ослабления зависит от толщины, плотности контролируемого объекта, а также от интенсивности и энергии излучения. При наличии внутренних дефектов в материале изменяются интенсивность и энергия пучка излучения, что может быть использовано для определения наличия дефектов в контролируемом объекте.

Применение радиационного метода неразрушающего контроля из-за его бесконтактности и независимости от многих технологических параметров исследуемых объектов (шероховатости, закалки и др.) в ряде случаев делает его предпочтительным.

При радиационном контроле используют, как минимум, три основных элемента:

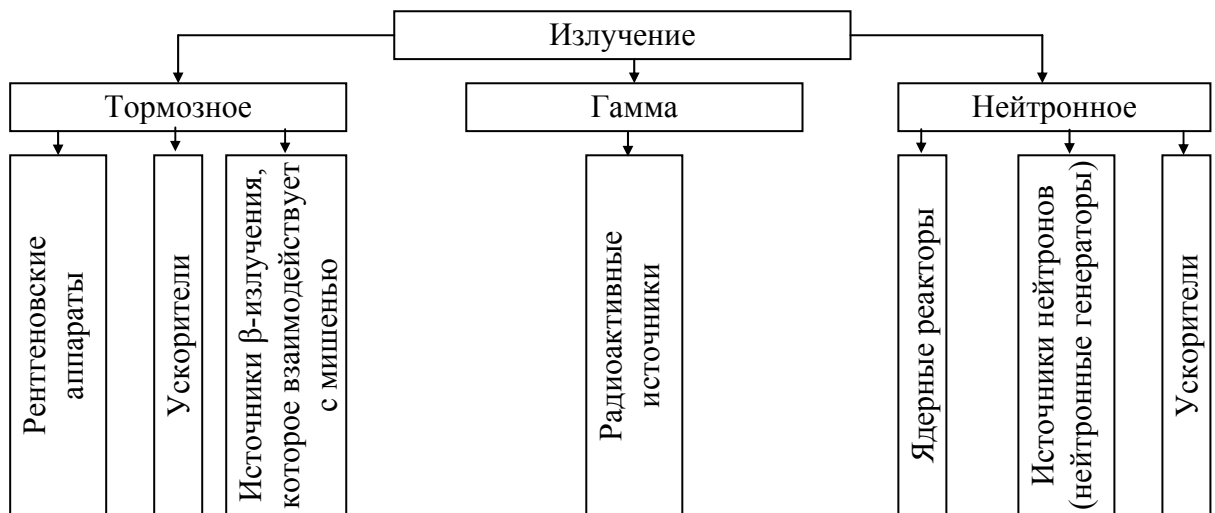
1. Источник ионизирующего излучения;
2. Контролируемый объект;
3. Детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

В качестве источников излучения используются источники, указанные на рисунке. Обычно используются рентгеновское, гамма-, бета-, нейтронное излучения, в соответствии с чем различают рентгеновский метод, гамма- и бета-дефектоскопию, нейтронографию.

Используя указанные источники, можно проводить контроль стальных изделий толщиной от 1 до 700 мм.

Дефект должен иметь достаточную протяженность в направлении прохождения излучения, чтобы дать заметное изменение интенсивности. При рациональном выборе парамет-

ров аппаратуры удается зарегистрировать дефекты протяженностью 1...2% от размера изделия в направлении распространения излучения.



Источники излучения, используемые при радиационном контроле

Методы радиационного контроля различаются по способам детектирования дефектоскопической информации и делятся на

- 1) *радиографические* — фиксация изображения на плане;
- 2) *радиоскопические* — наблюдение изображения на экране;
- 3) *радиометрические* — регистрация электрических сигналов.

Кратко рассмотрим перечисленные методы.

Радиография

Радиографические методы радиационного НК основаны на преобразовании излучения, прошедшего через объект контроля, в радиографический снимок с помощью фоточувствительной пленки, фотобумаги или полупроводниковой пластины, с которой изображение переносится на обычную бумагу (ксеро- или электрорадиография).

Еще до недавнего время в промышленной радиографии в качестве детектора излучения используются рентгеновские пленки.

Основная характеристика пленок — *оптическая плотность почернения*

$$D = \lg(I_{\text{пад}}/I_{\text{прош}}),$$

где $I_{\text{пад}}$ — интенсивность падающего излучения; $I_{\text{прош}}$ — интенсивность прошедшего излучения.

Чувствительность рентгеновской пленки — величина обратная дозе в *рентгенах*, которая необходима для получения определенной плотности почернения.

Коэффициент контрастности рентгеновских пленок g :

$$g = dD/d \lg D_n .$$

Это способность пленки преобразовывать дозу D_n излучения в оптическую плотность почернения пленки.

Недостатки рентгеновской пленки очевидны:

- использование драгоценных металлов — серебра;
- необходимость химической обработки и потеря серебра.

Чтобы исключить применение рентгеновской пленки и получать изображение на обычной фотобумаге, применяются флюоресцирующие неметаллические экраны на основе CaWO_4 . Под действием излучения флюоресцирующие экраны светятся вторичным излучением в оптическом диапазоне, которое воздействует на фотобумагу, на которой образуется оптическое изображение. Разумеется, этот метод дешевле, так как требует меньшее количество дорогостоящего серебра.

В последнее время все большее применение получает *ксерорадиографический (электрорентгенографический)* контроль, когда в качестве детектора применяются полупроводниковые пластины из аморфного селена, который наносят на алюминиевые подложки толщиной около 2 мм.

Фотополупроводниковый слой в отсутствие излучения является хорошим изолятором с удельным сопротивлением $10^{12} \dots 10^{15}$ Ом·см. При облучении полупроводника, в том числе селена, электропроводность полупроводника существенно возрастает. Это обусловлено переходом электронов под действием излучения в зону проводимости, а сам физический эффект называется *фотоэффектом* или *фотопроводимостью*. Если предварительно зарядить слой селена, то образуется своеобразный конденсатор — слой селена с подложкой. При облучении рентгеновским или гамма-излучением сопротивление селена уменьшается $10^2 \dots 10^5$ раз. При этом происходит локальная разрядка, причем заряды стекают в строгом соответствии с поглощенной дозой излучения, попавшего на этот участок, и на поверхности, предварительно заряженной селеновой пластины, создается рельеф потенциала, образующий электростатическое изображение контролируемого объекта. Это изображение делается видимым, если его проявить с помощью заряженных мелкодисперсных частиц красителей. Полученное изображение закрепляется в парах органического растворителя (смесь ацетона с толуолом).

Ксерорадиография — экономичный и высоко экспрессный метод, обеспечивающий получение изображения без химических процессов на обычной бумаге. Чувствительность электрорентгенографии не уступает пленочной рентгенографии.

Радиоскопия (радиационная интроскопия)

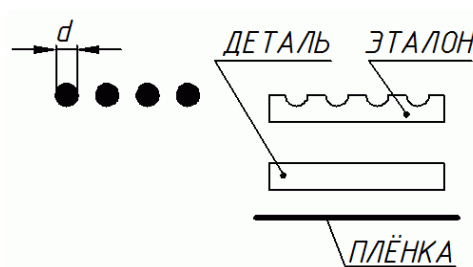
Этот метод радиационного НК основан на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в световое изображение на выходном экране радиационно-оптического преобразователя. Анализ полученного изображения проводится под разными углами в реальном масштабе времени в процессе контроля. С помощью этого метода можно получить видимое динамическое изображение внутренней структуры на экране телевизионного приемника. Чувствительность этого метода несколько уступает радиографии.

В качестве детекторов применяются:

- флюороскопические экраны;
- электронно-оптические преобразователи;
- оптические усилители;
- телевизионные системы.

Радиографический контроль с использованием рентгеновской пленки

Исторически сложилось так, что рентгеновская пленка долгое время была единственным средством регистрации излучения. Для того, чтобы на снимке получить изображение высокого качества, прежде всего, необходимо правильно подобрать режимы экспозиции. Для этого используют эталон чувствительности, который представляет собой пластину с нанесенными канавками или с заданным шагом расположенную проволоку. Эталон помещают на контролируемый участок поверхности детали, облучая такой «сэндвич», определяют минимальный размер d канавки или проволоки, который можно зафиксировать с помощью этого метода.



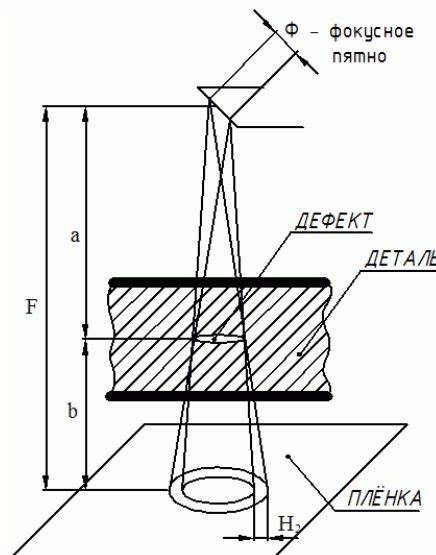
Например, в стали с помощью рентгеновского излучения можно выявить дефект размером $1,5 \div 3\%$ от толщины детали; гамма-графическим — $2 \div 4\%$ от толщины.

На резкость и контрастность изображения влияют следующие факторы:

1. Геометрические условия просвечивания — фокусное пятно источника излучения, фокусное расстояние, размер поля облучения и расстояние между пленкой и деталью (дефектом).
2. Характеристики пленок, флуоресцирующих усиливающих экранов и условия фотообработки пленки.
3. Интенсивность рассеянного излучения и меры защиты пленки от этого излучения.
4. Размеры, форма и тип дефекта, его расположение относительно направления просвечивания.
5. Жесткость излучения, толщина и плотность просвечиваемого материала.
6. Использование металлических фильтров и компенсаторов.

Первые три фактора влияют преимущественно на резкость изображения, а остальные три — на контрастность.

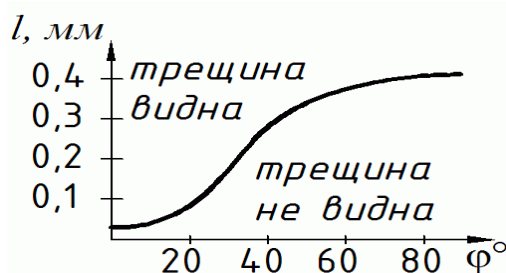
Геометрическая нерезкость обусловлена конечным размером фокусного пятна $H_r = b\Phi / (F - b)$.



Ясно, что нерезкость можно уменьшить, уменьшая размер фокусного пятна, уменьшением расстояния между деталью и пленкой b , а также увеличением фокусного расстояния F . Из рисунка видно, что изображение получается несколько увеличенным.

Влияние размеров, формы и вид дефекта и его расположения относительно направления просвечивания

Хорошо раскрытые и глубокие дефекты, имеющие прямолинейные границы, на снимке выявляются лучше, чем дефекты округлой формы (поры, раковины), что объясняется различием разности и контрастности их изображения. Трещины обнаружить методом просвечивания достаточно трудно, если неизвестно направление их распространения в глубь металла. При больших углах (излучение перпендикулярно трещине) выявляются лишь сильно раскрытые трещины



l – ширина трещины; φ – угол между плоскостью трещины и осью просвечивания

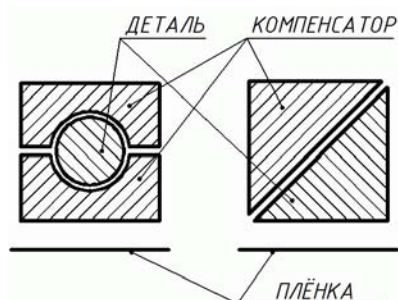
Применение фильтров и компенсаторов

При просвечивании деталей, имеющих переходы от тонких сечений к толстым, получаются сильно контрастные негативы. Для того чтобы получить качественный снимок деталей, имеющих большой перепад толщин, используют фильтры и компенсаторы.

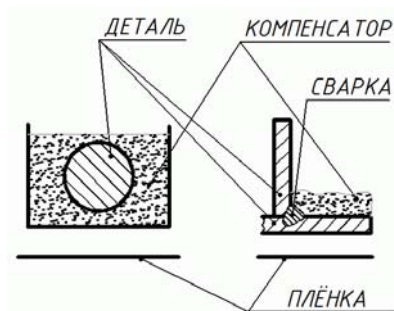
Назначение фильтров — отфильтровать мягкое и получить однородный пучок жесткого излучения. С увеличением жесткости излучения уменьшается контрастность изображения.

Компенсаторы применяются для выравнивания толщины просвечиваемого материала. На рисунках показаны типы компенсаторов и способы их применения:

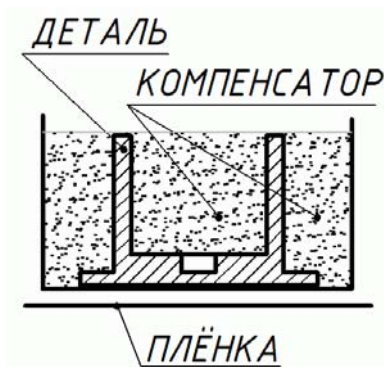
а) твердые;



б) сыпучие — изготавливаются из мелкой дроби или металлических опилок;



в) жидкие — это водные растворы $BaCl_2$ и BaI_2 ;



г) мастики — представляют собой пасты на основе парафина, олифы, барита, азотнокислого свинца и т.п.

Применение компенсаторов вместе с фильтрами позволяет почти полностью сгладить разницу в почернении негатива при просвечивании деталей с перепадом толщины за одну экспозицию.

Особенности основных радиационных методов контроля

Рентгеновский метод основан на регистрации интенсивности рентгеновских лучей, прошедших через контролируемое изделие, рассеянных или излучаемых им. Поскольку коэффициенты поглощения лучей различны для разных сред, при пропускании рентгеновского излучения через изделие наличие дефектного участка приводит к изменению интенсивности регистрируемого излучения. Интенсивность рентгеновского излучения регистрируют в простейшем случае с помощью фотопленки, на которой получают изображение проекции изделия с имеющимися дефектами. Для тех же целей используют флуоресцирующие под действием гамма-излучения экраны. Применяются также системы со сканированием объекта, когда изменение интенсивности прошедшего излучения с помощью детекторов — сцинтилляционного, полупроводникового и др. — преобразуется в электрический сигнал, используемый затем в системе обработки информации.

Дефект должен иметь достаточную протяженность в направлении прохождения излучения, чтобы дать заметное изменение интенсивности. При рациональном выборе параметров аппаратуры удается зарегистрировать дефекты протяженностью 1...2% от размера изделия в направлении распространения излучения.

Разработаны бетатроны, линейные ускорители электронов и микротроны с энергией электронов до 20...25 МэВ, позволяющие получить жесткое тормозное рентгеновское излучение, с помощью которого могут быть проконтролированы стальные изделия толщиной до 500 мм.

При регистрации рассеянного рентгеновского излучения дефекты проявляют себя, вызывая изменения интенсивности излучения, рассеянного на данный угол.

Все более широкое распространение получает рентгено-телевизионный метод, при котором рентгеновское изображение получают с помощью сцинтиллирующего кристалла; полученное изображение через оптическую систему воспринимается передающей телевизионной трубкой, преобразующей изображение в электрический телевизионный сигнал.

Рентгеновский метод используют для контроля сварных швов и дефектов литья, прокатки иковки и других контрольных операциях.

Гамма-дефектоскопия основана на тех же физических принципах, что и рентгеновский метод. Отличие состоит в природе излучения. Источники гамма-излучения, в качестве которых обычно используют изотопные источники, более компактны, чем рентгеновские аппараты, однако требования к защите от излучений более жесткие, поскольку гамма-излучение нельзя «выключить» по желанию. Области применения — те же, что у рентгеновского метода. Например, в реакторной технологии используется метод гамма-авторадиографии, при котором источником излучения является сам контролируемый объект.

Для радиографического контроля используются источники гамма-излучения на основе радионуклидов кобальт-60, селен-75, цезий-137, тулий-170, иридий-192. Широкое использование в радиографии источника селен-75 с эффективной энергией 200...250 кэВ ограничивалось низкой удельной активностью. Разработаны и освоены в серийном производстве новые острофокусные источники гамма-излучения для радиографии на основе селена-75 с удельной активностью до 1000 Ки/г. Эти источники имеют размеры активной части от 1×1 до 3,5×3,5 мм и активность от 2,5 до 150 Ки.

Принципы бета-дефектоскопии аналогичны принципам рентгенографии. Просвечивание объекта монохроматическим пучком электронов высокой энергии (3...6 МэВ) с использованием спектрометрического метода регистрации обеспечивает чувствительность 0,06...2% от толщины изделия. Обратное рассеяние электронов используется для контроля покрытий.

В современных портативных рентгеновских аппаратах для контроля нефте- и газопроводов используют принципы сверхвысокочастотного ускорения, развитые в ускорительной технике. Ускоряющее напряжение составляет 300...500 кВ при токе 1...5 мА, толщина просвечиваемого слоя стали составляет 50...100 мм, размер фокусного пятна — от $2 \times 0,7$ мм. При этом массу излучателя удалось уменьшить до 30 кг. Чувствительность контроля не хуже 1%.

Нейтронно-активационный метод определения состава вещества основан на облучении последнего потоком нейтронов и измерении наведенной активности — интенсивности и энергетического спектра вторичных ионизирующих излучений, сопровождающих распад образовавшихся радиоактивных нуклидов, а также периода полураспада $T_{1/2}$ этих нуклидов. При известном виде ядерной реакции по полученным значениям $T_{1/2}$ можно однозначно определить порядковый номер Z исходных ядер в периодической системе и их массовые числа. Так как число распадов в единицу времени пропорционально числу исходных ядер, возможен количественный анализ.

В настоящее время фирмы, производящие рентгеновское оборудование, серийно выпускают переносные, передвижные и стационарные рентгеновские аппараты на номинальное анодное напряжение от 100 до 450 кВ, мощностью до 4,5 кВт, позволяющие просвечивать объекты из стали толщиной до 100 мм, а ускорители электронов — до 600 мм. Часть аппаратов оснащена двухфокусными металлокерамическими рентгеновскими трубками и встроенной в пульт автоматикой, обеспечивающей оптимальную по параметрам экспозиции (кВ, мА, время экспозиции) съемку.

Разработаны образцы малогабаритных импульсных бетатронов с максимальной энергией ускоренных электронов до 7,5 МэВ. Они в основном предназначены для инспекции строительных конструкций в полевых условиях. Мощность экспозиционной дозы тормозного излучения достигает 6 Р/мин и более на расстоянии 1 м. Автоматизированная система управления обеспечивает настройку ускорителя на максимум излучения, диагностику режимов работы, отключение его при наборе заданной дозы излучения. Исследования показали, что обеспечивается радиографический контроль стальных изделий толщиной 40...250 мм. Толщина просвечиваемых железобетонных конструкций достигает 1200 мм, причем выявляется стальная арматура диаметром 1,6...6 мм.

Метод многокурсовой радиометрии является развитием обычного радиометрического и позволяет увеличить надежность и информативность контроля. Сущность его заключается в просвечивании объекта под различными ракурсами, используя набор детекторов,

регистрирующих излучение по различным направлениям. Полученные разноракурсные дефектограммы представляются в виде полутоновых изображений на экране дисплея и могут последовательно просматриваться и анализироваться. Обнаруженные сигналы от дефекта идентифицируются оператором с помощью курсора на изображениях различных ракурсов. Затем программно определяются размеры и координаты дефектов. Вероятность обнаружения увеличивается за счет того, что ориентированные дефекты могут иметь более интенсивный сигнал в одном ракурсе и менее интенсивный — в другом.

Специальное программное обеспечение позволяет синтезировать изображение развертки объекта исследования с помощью ЭВМ на основе данных сканирования, визуализировать его на экране полутонного дисплея с большой степенью точности оцифровки входного сигнала (12 и более двоичных разрядов) и привязки по координатам каждого пиксела изображения к соответствующим исследуемым зонам объекта, а также определить конфигурацию и координаты аномалий.

Используют телевизионные камеры на рентгенодиодах, преобразующих рентгеновское излучение в электрическое напряжение, величина которого пропорциональна интенсивности излучения. Диоды расположены линейно и перпендикулярно оси контролируемого изделия. Разброс характеристик отдельных рентгенодиодов компенсируется аппаратно-программным способом.

Относительно новой является система детектирования сцинтиллятор — фотодиод.

В последние годы в рентгеновской диагностике наблюдается тенденция постепенного перехода к цифровой рентгенографии. В новых разработках вообще не предусматриваются устройства для съемки на рентгеновскую пленку. В отличие от рентгенографии со съемкой на пленку аппаратура цифровой рентгенографии осуществляет промежуточное преобразование рентгеновского изображения в адекватное цифровое, обработку и представление изображения в реальном масштабе времени.

Основными преимуществами аппаратуры цифровой рентгенографии по сравнению с рентгенографией на пленку являются более низкая лучевая нагрузка, возможность рентгенологического исследования в динамике, более высокая надежность и широкие возможности рентгенологических исследований, связанные с обработкой изображений в реальном масштабе времени. Последнее позволяет усовершенствовать существующие методики рентгенологических исследований и создать новые.