

БЕТАТРОННЫЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ КОНТРОЛЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. И. ГОРБУНОВ, А. В. ПОКРОВСКИЙ, А. К. ТЕМНИК

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института
электронной интроскопии)

Неразрушающий контроль сварных соединений с применением источников проникающего излучения занимает среди других методов контроля одно из ведущих мест.

В радиационной дефектоскопии широко используются в настоящее время в качестве источников излучения радиоактивные изотопы, рентгеновские аппараты, бетатроны и некоторые другие ускорители. В последние годы все больший удельный вес приобретает строительство крупногабаритных агрегатов и установок различного назначения. Применяемые в этих агрегатах в качестве составляющих их элементов детали имеют большие толщины. Требования к качеству сварного соединения во многих случаях весьма жесткие. Так, в сварных соединениях барабанов котельных агрегатов, сварных сосудах с толщиной металла до 400 мм (сталь) уже недопустимыми являются локальные включения размерами в диаметре всего несколько миллиметров.

Применяемый для просвечивания больших толщин источник гамма-излучения $Co-60$ дает излучение со средней энергией 1,25 Мэв.

С хорошей чувствительностью и временем на одну экспозицию данным изотопом можно просвечивать сварные швы толщиной до 150 мм. Сокращение времени экспозиции связано с увеличением активности источника, а это приводит к увеличению излучающего тела изотопного источника до 4 мм и более в диаметре. В результате увеличивается геометрическая нерезкость, а соответственно уменьшается чувствительность радиографического контроля. К этому необходимо добавить, что вопрос о защите от излучения при работе с изотопами большой активности в производственных условиях оказывается весьма сложным.

Существенный прогресс в эту область внесло использование электронных ускорителей, и в особенности бетатронов.

Бетатрон наиболее широко применяют для дефектоскопии материалов и изделий. Источник высокоэнергетического электромагнитного излучения представляет собой индукционный ускоритель электронов. Максимальная энергия тормозного излучения и интенсивность являются основными параметрами, характеризующими определенный тип бетатрона.

В бетатронах, выпускаемых в нашей стране и за рубежом, предусматривается возможность регулируемого изменения максимальной энергии тормозным излучением в определенных пределах. Бетатроны с энергией тормозного излучения в диапазоне 25—35 Мэв разработаны для целей промышленного просвечивания. Практически доступная для

контроля с помощью бетатронов толщина стали увеличилась до 400—500 мм. При этом чувствительность радиографирования не хуже 1—2% просвечиваемой толщины. Хотя экономический эффект от внедрения бетатронов в практику радиационной дефектоскопии оценить довольно затруднительно, опыт проведения контроля толстостенных ответственных изделий показывает, что даже кратковременный выход из строя таких установок и агрегатов, включенных в энергетический или химический комплекс, обойдется во много раз дороже средств, затраченных на их контроль. Во многих случаях просвечивание излучением бетатрона на сегодняшний день является единственно возможным методом неразрушающего контроля изделий большой толщины. Примером тому могут служить контроль швов сварных рулонированных сосудов, а также контроль сварных соединений, выполненных из аустенитных сталей, где ультразвуковые методы контроля качества сварки не могут быть использованы.

Многообразие решаемых в радиационной дефектоскопии задач вызвало применение большого количества детекторов для регистрации информации о дефектах. Так, наряду с рентгеновской пленкой в настоящее время широко используются детекторы других типов: сцинтилляционные газоразрядные счетчики, ионизационные камеры. Данные детекторы, преобразующие информацию о дефектах в электрические сигналы, позволили перейти на автоматический 100-процентный контроль. Причем, используя сцинтилляционные детекторы излучения, получаем чувствительность, соизмеримую с чувствительностью радиографического метода регистрации. При этом производительность контроля удается значительно повысить в ряде случаев более, чем на порядок.

Автоматизация методов радиационной дефектоскопии путем применения сцинтилляционных детекторов имеет и то преимущество, что данные о результатах контроля поступают непрерывно и могут быть представлены в виде записи на ленте прибора-индикатора.

В радиометрических системах радиационной дефектоскопии отсутствует наглядность в представлении формы дефекта, поэтому, как правило, осуществляют дублирование обследованных дефектных участков. Такое сочетание двух методов регистрации хотя и приводит к некоторому снижению производительности, однако позволяет получить исчерпывающую информацию о качестве изделия.

Характер и размер дефекта наиболее наглядно можно получить, используя радиографический метод регистрации излучения. При этом чувствительность радиографического метода бетатронной дефектоскопии в области толщин стали 100÷400 мм в пределах 1—1,5%.

На рис. 1 представлена зависимость чувствительности радиографического метода от толщины изделия для бетатронов с энергией 25, 35 МэВ, а также для изотопа $Co-60$.

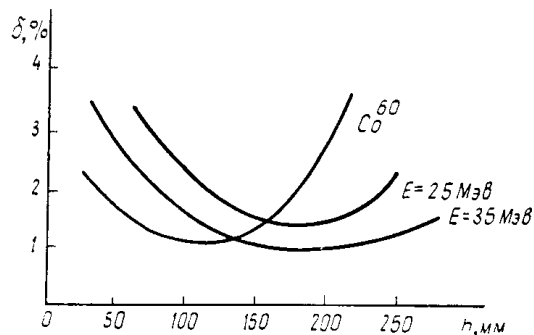


Рис. 1. Зависимость чувствительности радиографического контроля от толщины изделия (сталь).

Как видно из рис. 1, начиная с 150 мм при использовании изотопных источников из-за недостаточной энергии излучения, чувствительность контроля становится хуже, чем при использовании тормозного излучения с максимальной энергией 25—35 Мэв в 1,5—2 раза. Время просвечивания для радиографии определяется при заданном уровне механизации и автоматизации контроля временем экспозиции. Если сравнить время экспозиции для Co-60 активностью 50 г/экв радия и ранее названных бетатронов, обеспечивающих мощность дозы соответственно 40 и 250 рентген в минуту на метре от мишени, то уже при толщине слоя стали, равном 100 мм для изотопа Co-60 экспозиции равна 25 мин. Для бетатронов это время в несколько раз меньше. Снижение времени экспозиции целесообразно проводить до такого предела, когда время экспозиции будет примерно равно вспомогательному времени 5. Вспомогательное время на одну экспозицию колеблется в пределах 2—6 минут. Тогда эффективность применения бетатронов в радиационной дефектоскопии, с точки зрения производительности, начинает доминировать при просвечивании изделий толщиной более 120—150 мм.

Работами авторов [3, 4, 5] показано, что и затраты на контроль при этом, несмотря на большую стоимость бетатронов по сравнению с источниками гамма-излучения, будут в несколько раз меньше.

Выбор типа и параметров бетатрона для целей радиационной дефектоскопии определяется, в первую очередь, требованиями чувствительности контроля, спецификой производства (массовое или единичные снимки), размерами, формами, материалом изделий, подлежащих контролю.

Эффективность применения того или иного источника определяется, в первую очередь, интенсивностью излучения и его энергетическим составом, так как с точки зрения чувствительности, затрат на контроль, производительности для каждого диапазона толщины существует оптимальная энергия и интенсивность. Выбор источника излучения и его параметров необходимо производить с учетом метода регистрации излучения.

Для радиометрического метода регистрации бетатронной дефектоскопии энергия излучения не является определяющим параметром, так как практически работа осуществляется в прямом пучке, а влияние рассеянной составляющей на чувствительность контроля устраняется с помощью коллимации детекторов. При максимальной энергии тормозного излучения 25—35 Мэв и мощности дозы не менее 150—250 р/мин можно успешно контролировать сварные соединения толщиной до 400 мм и более при скорости до 3 м в минуту. Основное требование к источнику при радиометрическом методе регистрации — это высокая стабильность интенсивности излучения, не ниже 1—2%. При этом чувствительность контроля достигает одного процента и выше. Требуемая стабильность интенсивности излучения может быть обеспечена при автономном питании бетатрона от системы мотор—генератор и применении специальной схемы стабилизации.

Для радиографического метода регистрации чувствительность, особенно в области больших толщин, зависит от максимальной энергии, так как в радиографии значительный вклад вносит рассеянное излучение.

Так, при толщине шва 300 мм чувствительность для энергии тормозного излучения 30 Мэв выше, чем для энергии 15 Мэв примерно в полтора раза.

Повышение энергии бетатрона до 30—35 Мэв приводит к увеличению мощности дозы до 250—400 р/мин. При такой энергии излучения чувствительность радиографии не хуже одного процента при толщине стали до 350 мм, время экспозиции в пределах нескольких минут. Кро-

ме того, излучение бетатрона с максимальной энергией 25—35 Мэв обладает наибольшей проникающей способностью при просвечивании стали. Толщина слоя половинного ослабления интенсивности тормозного излучения бетатрона с энергией 30 Мэв незначительно отличается от аналогичной толщины для энергии излучения 25 Мэв. Для энергии 30 Мэв величина фактора накопления меньше, чем для 20 Мэв и, следовательно, меньше вклад рассеянного излучения. Окончательные рекомендации по выбору типа и параметров бетатрона производятся на основе анализа конкретных условий производства, и тем не менее они должны базироваться на вышеприведенных положениях.

Как уже отмечалось, современная энергетика использует сварные сосуды (барабаны), работающие под давлением несколько сот атмосфер при температуре перегретого пара свыше 600° С. Толщина швов в таких изделиях достигает 200 мм и более. Контроль качества сварных швов в условиях производства до последнего времени осуществлялся выборочным просвечиванием изотопом Со-60 с регистрацией на пленку, а также методом ультразвуковой дефектоскопии. Однако чувствительность и производительность гамма-графического метода при просвечивании стали толщиной более 150 мм радиоактивными изотопами не удовлетворяет требованиям современного производства. Время экспозиции при просвечивании аппаратом ГУП-Со-60 шва толщиной 155 мм составляет 25—30 минут, общее время контроля барабана (баллона) с длиной швов 35—40 м — около ста часов.

В НИИ электронной интроскопии при Томском политехническом институте в течение 1962—1972 гг. был разработан и внедрен на производстве бетатронный дефектоскоп для автоматического контроля сварных соединений с толщиной шва до 350 мм.

Контролю подвергаются сварные сосуды длиной до 15 м и диаметром до 2 м. Приемником излучения служит блок сцинтилляционных счетчиков, число которых подобрано таким образом, что при ширине зоны контроля 100 мм перекрывается как продольный, так и кольцевой шов. Детекторы включены по дифференциальной схеме, что позволило при трех-пятипроцентной нестабильности интенсивности излучения бетатрона измерять однопроцентное изменение интенсивности, обусловленное детектором. Индикатором служит пятиканальный самопишущий миллиамперметр Н-320, на диаграммной ленте которого непрерывно записываются результаты контроля. Источником излучения выбран бетатрон с максимальной энергией 25 Мэв и мощностью экспозиционной дозы 40 р/мин.

С помощью данного дефектоскопа осуществляется стопроцентный автоматический контроль сварных швов, при этом результаты радиометрического контроля в месте обнаружения дефекта дублируются радиографированием. Рентгеновская пленка подается в зону контроля автоматически в течение 30 секунд. Дефектоскоп установлен в специально оборудованной лаборатории, которая объединяет бокс, ангар бетатрона с конденсаторной батареей и пультовую. Бокс представляет собой бетонированную траншею глубиной 5,5 м и площадью около 150 м². В боксе по рельсам перемещается изделие, установленное на платформу с кантователями. В противоположном конце бокса по ходу перемещения платформы на механизме вертикального перемещения закреплена штанга диаметром 320 мм и длиной 12 м. При контроле продольных швов сосуд наезжает на штангу, на конце которой установлен приемник излучения. Штанга перемещается в вертикальной плоскости и устанавливается по оси лазерного отверстия. Диаметр сосудов меняется от 200 до 1000 мм. Над боксом в месте расположения приемника излучения располагается бетатрон. Специальный механизм позволяет перемещать его вверх—вниз и осуществлять поворот вокруг оси.

Просвечивание сосудов осуществляется тормозным излучением, направленным вертикально вниз.

Регистрирующая аппаратура радиометрического тракта дефектоскопа кроме многоканальной системы сцинтилляционных детекторов и регистрирующего прибора содержит блок обработки сигнала с детектора, коммутатор, блок питания. Все измерительные приборы и аппаратура управления вынесены в общий пульт.

При обнаружении дефекта это место маркируется, изделие останавливается и осуществляется рентгеносъемка. Размер зарегистрированного дефекта для радиометрического метода определяется сопоставлением амплитуды пика на диаграммной ленте от дефекта и эталона, эталон кроме того служит для периодической проверки чувствительности дефектоскопа.

Чувствительность дефектоскопа при скорости 1 м в минуту лучше одного процента практически при всех контролируемых толщинах. Чувствительность для каналов, удаленных от оси пучка, хуже на 10—15% вследствие большого уровня шумов.

В многоканальных системах при радиометрическом методе регистрации одним из основных вопросов является выбор числа каналов. Выбор числа каналов неразрывно связан с выбором фокусного расстояния. При работе с выравненным или ограниченном малыми углами пучком излучения, когда чувствительность детекторов, установленных в центре поля и по краю, отличается незначительно, оптимальным параметром целесообразно выбрать производительность контроля вследствие того, что чувствительность достигается лучше той, которая требуется по нормам контроля. В этом случае увеличение производительности возможно двумя путями.

Первый путь — повышение производительности за счет увеличения скорости контроля. С увеличением скорости контроля чувствительность убывает обратно пропорционально этому параметру. При определенной скорости реальная и требуемая чувствительность совпадают. Это в данном случае и будет максимальная скорость контроля. Вторым путем — осуществлять построчный контроль, уменьшив число каналов, при этом фокусное расстояние можно уменьшить, а скорость контроля увеличить.

Исследования радиометрического метода бетатронной дефектоскопии, проведенные при контроле сварных соединений, позволили найти оптимальные сочетания между основными параметрами дефектоскопа.

Производственные испытания подтвердили данные по чувствительности при выявлении реальных дефектов. Так, чувствительность радиометрического метода бетатронной дефектоскопии при просвечивании сосудов 92—155 мм находится в пределах 1—1,5% по эталонам ГОСТ 7512-69. Этим методом были обнаружены отдельные поры диаметром 3—3,5 мм, свищи диаметром около 1,5 мм, непровар глубиной 2 мм. Результаты радиометрического контроля проверены радиографированием.

На рис. 2 приводится дефектограмма сварного шва, где зарегистрирован дефект в виде поры и шлакового включения указанных размеров. Расшифровка результатов контроля — выделение дефекта на уровне шумов даже близкого к порогу чувствительности, как видно на рис. 2, не представляет больших трудностей, так как характер представления дефекта (двухкратная фиксация) отличается от характера «белого шума». Надежность регистрации — воспроизводимость результатов для порогового дефекта практически близка к 100%. Расчетная величина ее составляет 0,995. Характер записи дефектов на ленте электронного потенциометра позволяет определять протяженность дефекта. Длина дефекта в направлении движения изделия определяется произведением отношения скоростей изделия и диаграммной ленты на протяженность

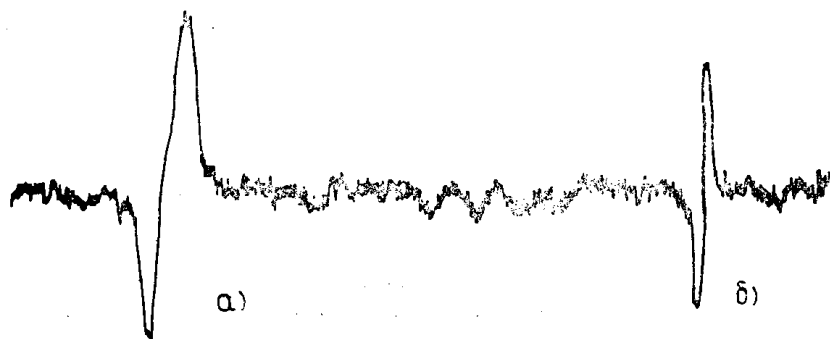


Рис. 2. Дефектограмма сварного шва: а — дефект; б — проволочный дефектометр.

выброса от дефекта на диаграммной ленте и чувствительностью контроля.

На основании полученного практического материала можно дать некоторые рекомендации для разработки и эксплуатации бетатронных дефектоскопов при радиометрии и радиографии. Как показала производственная эксплуатация дефектоскопа для контроля подавляющей номенклатуры изделий (исключая быстротекающие процессы технологии), производительность контроля следует выбирать таким образом, чтобы время экспозиции составляло по отношению к вспомогательному не менее 50%. Отсюда нетрудно перейти к граничной скорости и числу каналов. Учитывая, что при чувствительности в пределах 1% для $E_{\max} = 25$ Мэв и толщине стали до 250 мм увеличение производительности за счет перехода от 2—3-х каналов к 5—10 не превышает 20—30%, очевидно, в этих случаях не следует идти по пути увеличения числа каналов и усложнения установки и целесообразно ограничиться 3—5 каналами с площадью коллиматора 1,5 см². При этом производительность лежит в пределах 6 м²/час. Такая производительность в среднем в 3—4 раза выше по сравнению с радиографией при примерно одинаковой чувствительности. Конструктивные параметры дефектоскопа, такие как размеры коллиматора, диаметр и высота сцинтиллятора могут быть рассчитаны с необходимой для практики точностью (20—30)% при заданном объеме выявляемого дефекта и вероятности его обнаружения. Ввиду значительных пространственно-временных флуктуаций интенсивности излучения бетатрона достижение высокой чувствительности и надежности обнаружения дефектов при радиометрии возможно только при автономном питании всей установки от стабилизированного источника напряжения или за счет использования в системе энергоснабжения установки мотор-генератора, поддерживающего напряжение с точностью 0,5%. Надежность выполнения дефектоскопом всей задачи может быть доведена до 0,995 и выше, однако при этом необходимо, во-первых, подобрать идентичными ряд основных элементов схемы регистрации каналов, во-вторых, увеличить надежность бетатрона и схемы измерения с введением горячего резерва радиометрического тракта.

При радиографировании достигнута максимальная выявляемость дефектов с пленкой РТ-5 и экранами ЗПЗ,5. При толщине сосуда 155 надежно регистрируются поры диаметром 1,5 мм и непровары раскрытием 1 мм и более. Оптимизация режима просвечивания при выбранной пленке и экранах должна проводиться по производительности, так как производительность как функция фокусного расстояния имеет максимум. Сопоставление бетатронного дефектоскопа для рассматриваемых условий с изотопной установкой ГУП-Со-50 показывает, что последняя проигрывает в среднем в 3—4 раза по производительности и затратам и в 2—2,5 раза по чувствительности.

Следует отметить, что внедрение подобных установок в машиностроении, судостроении и других отраслях является и экономически целесообразным.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. В. Румянцев. «Радиационная дефектоскопия». М., Атомиздат, 1968.
2. А. А. Воробьев, В. И. Горбунов, А. В. Покровский. Контроль сварных соединений больших толщин с помощью бетатронного дефектоскопа, «Сварочное производство», 1968, № 1.
3. В. А. Бердоносков, В. А. Воробьев, А. В. Покровский. Оценка эффективности применения бетатрона при радиометрическом методе дефектоскопии сварных соединений, «Сварочное производство», 1968, № 2.
4. Бетатронный дефектоскоп БД-2 для контроля толстостенных сварных соединений. Информационный бюллетень № 9 (39), 1970.
5. А. К. Темник. Кандидатская диссертация. Томск, 1968.
6. Л. М. Ананьев, А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. М., Атомиздат, 1961.