

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева

С. С. Ивасев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

*Утверждено редакционно-издательским советом
университета в качестве учебного пособия для бакалавров,
обучающихся по направлению подготовки 27.03.01
«Стандартизация и метрология» очной формы обучения*

Красноярск 2015

УДК 621.791
ББК 34.441 А 49
И17

Рецензенты:
главный метролог П. И. Сизых
(ОАО «Красноярский машиностроительный завод»);
кандидат технических наук, доцент Л. К. МАЛЬКО
(Сибирский государственный аэрокосмический университет
имени академика М. Ф. Решетнева)

Ивасев, С. С.

И17 Методы неразрушающего контроля : учеб. пособие / С. С. Ивасев, А. В. Гирн, Д. В. Раводина ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2015. – 112 с.

Рассмотрены различные методы неразрушающего контроля, основанные на взаимодействии электромагнитных излучений с объектами контроля. Дана классификация методов неразрушающего контроля. Приведены сведения по теории, оборудованию и технологии различных методов контроля.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 27.03.01 «Стандартизация и метрология». Также может быть полезно студентам технических специальностей, при изучении дисциплин, в которых тема «Контроль качества изделий» входит как отдельный раздел.

УДК 621.791
ББК 34.441 А 49

© Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева, 2015
© Ивасев С. С., Гирн А. В., Раводина Д. В., 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений	4
Предисловие	5
1. Виды дефектов и методы их выявления	6
1.1. Виды дефектов	6
1.2. Методы неразрушающего контроля	9
Контрольные вопросы и задания	14
2. Выбор методов неразрушающего контроля	15
Контрольные вопросы и задания	18
3. Визуально-оптический контроль	19
Контрольные вопросы и задания	21
4. Радиационные методы контроля	22
4.1. Основные сведения о радиационном контроле	22
4.2. Классификация радиационных методов контроля	32
Контрольные вопросы и задания	48
5. Магнитная дефектоскопия	49
Контрольные вопросы и задания	57
6. Вихретоковая дефектоскопия	58
Контрольные вопросы и задания	61
7. Капиллярные методы дефектоскопии	62
Контрольные вопросы и задания	70
8. Методы контроля на герметичность	71
8.1. Масс-спектрометрический метод	74
8.2. Галогенный метод	80
Контрольные вопросы и задания	83
9. Ультразвуковой контроль	84
9.1. Способы возбуждения ультразвуковых колебаний	84
9.2. Методы ультразвукового контроля	87
9.3. Аппаратура ультразвукового контроля	90
Контрольные вопросы и задания	108
Послесловие	110
Библиографический список	111

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время широко применяются методы и средства неразрушающего контроля (НК) изделий машиностроения, позволяющие проверять качество, не нарушая их пригодности для дальнейшего использования по назначению.

Исследование изменений физических характеристик материалов и обнаружение дефектов, являющихся причиной этих изменений, составляет физическую основу методов неразрушающего контроля. Достоинствами методов НК являются высокая надежность и достоверность контроля, возможность применения НК в пооперационном контроле изделий, возможность применения методов НК в условиях эксплуатации, сравнительно большая скорость контроля и др.

В учебном пособии приводится описание некоторых видов неразрушающего контроля по классификации ГОСТ 18353: магнитного, электрического, вихретокового, радиоволнового, оптического, радиационного, акустического и проникающими веществами. Каждый вид неразрушающего контроля в свою очередь классифицируется по трем различным признакам, поэтому количество методов неразрушающего контроля достаточно многочисленно. В работе представлены методы неразрушающего контроля, которые достаточно полно характеризуют возможности того или иного вида неразрушающего контроля в определении качества изделий.

В ряде отраслей промышленности методы НК занимают большую долю в технологическом процессе изготовления изделий, а затраты на контроль соизмеримы с затратами на изготовление изделия. Например, при изготовлении изделий авиаракетной техники, к которым предъявляются повышенные требования по качеству и надежности, затраты на контрольные операции достигают 25–35 % общей стоимости изделия.

Растущие требования к качеству продукции обуславливают необходимость подготовки специалистов, владеющих достаточной совокупностью знаний технологии, аппаратуры и организации методов НК. Изучению данной дисциплины должны предшествовать курсы физики, химии, технологические основы изготовления изделий, физические основы методов контроля и т. д.

Список сокращений

АЧХ	амплитудно-частотная характеристика
ВРЧ	временная регулировка чувствительности
ВТП	вихретоковые преобразователи
ДН	диаграмма направленности
ЗТВ	зона термического влияния
ЛЦ	люминесцентно-цветной
МЖ	магнитные жидкости
МПД	магнитнопорошковая дефектоскопия
МЭД	мощность экспозиционной дозы
НК	неразрушающий контроль
НТД	нормативно-техническая документация
ОК	объект контроля
ПАВ	поверхностно-активные вещества
ПНУ	передвижные намагничивающие устройства
ППЧ	полоса пропускания частот
ПЭП	пьезоэлектрический преобразователь
РС	раздельно-совмещенный
СВЧ	сверхвысокая частота
СО	стандартный образец
СОП	стандартный образец предприятия
ТУ	технические условия
УЗ	ультразвуковой, ультразвук
УФ	ультрафиолетовый
ФЭУ	фотоэлектронный умножитель
ЦТС	цирконат-титанат свинца
ЭЗМ	эхозеркальный метод
ЭДС	электродвижущая сила
ЭЛТ	электронно-лучевая трубка

1. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ И МЕТОДЫ ИХ ВЫЯВЛЕНИЯ

1.1. Виды ДЕФЕКТОВ

При изготовлении деталей и производстве сборочных узлов конструкций изделий часто образуются дефекты, которые условно можно поделить на дефекты, связанные со сваркой плавлением: дефекты подготовки и сборки деталей; дефекты формы сварного шва; наружные и внутренние дефекты.

К дефектам подготовки и сборки относятся неправильный угол скоса кромок шва; слишком большое или малое притупление по длине кромок; непостоянство зазора между кромками по длине стыкуемых элементов; несовпадение стыкуемых плоскостей; слишком большой зазор между кромками; загрязнения кромок.

Дефекты формы сварного шва обуславливаются отклонениями от формы и размеров шва, заданных в технических условиях и чертежах.

При выполнении сварных соединений разными методами сварки швы могут иметь неравномерные размеры, бугры, седловины. Подобные дефекты снижают прочность соединения и могут привести к появлению трещины.

К наружным дефектам относят наплывы, подрезы, незаделанные кратеры, прожоги.

Наплывы образуются в результате стекания расплавленного металла на нерасплавленный основной металл без сплавления с ним.

Подрезы – это канавки в основном металле, идущие по краям шва. Глубина подреза колеблется от десятых долей до нескольких миллиметров. Они уменьшают рабочую толщину основного металла, могут вызвать местную концентрацию напряжений от прилагаемых нагрузок и стать причиной разрушения шва в процессе эксплуатации. Подрезы в стыковых и угловых швах, расположенные перпендикулярно действующим на них силам, приводят к снижению вибрационной прочности.

Кратер – углубление, образующееся в конце шва при внезапном прекращении сварки. Кратеры чаще всего возникают при выполнении коротких швов. Размеры кратера в зависимости от величины сварочного тока колеблются от 3 до 20 мм. Незаделанные кратеры снижают прочность сварного соединения, особенно при воздействии вибрационной нагрузки.

Прожоги – это сквозные отверстия в сварном шве, чаще всего образуются при сварке металла небольшой толщины и начального слоя в многослойных швах, а также при сварке снизу вверх вертикальных швов. Независимо от причин, отверстие, возникшее при прожоге, заделывается, но шов получается неудовлетворительным по внешнему виду и качеству.

К внутренним дефектам относят поры, шлаковые включения, непровары, несплавления и трещины.

Поры – полости, заполненные газом, имеющие размеры от 0,1 до 3 мм в диаметре. Поры, выходящие на поверхность, могут быть и больших размеров. Причиной равномерной внутренней пористости является загрязненность свариваемого металла по кромкам, использование влажного флюса или отсыревших электродов. Наиболее вероятно появление пор при сварке алюминиевых и титановых сплавов.

Шлаковые включения в металле сварного шва – это малые объемы, заполненные неметаллическими веществами, чаще всего оксидами и шлаками. Шлаковые включения условно делят на макроскопические и микроскопические. Они могут быть различной формы: круглые, шарообразные, плоские в виде пленки или продолговатые в виде вытянутых «хвостов». По сравнению с порами, шлаковые включения имеют большие размеры, поэтому они лучше обнаруживаются при ультразвуковом и магнитном методах контроля.

Оксидные пленки могут возникать при всех видах сварки, причины их образования такие же, что и образование шлаковых включений.

Непровары и несплавления – это дефекты, возникающие в сварном соединении вследствие неполного расплавления кромок или поверхностей ранее выполненных валиков многослойного шва. Непровары и несплавления достаточно хорошо обнаруживаются при ультразвуковом контроле.

Трещины – частичное местное разрушение сварного соединения в виде разрыва, они относятся к наиболее опасным дефектам и по всем действующим нормам недопустимы. Различают трещины горячие и холодные, имеющие разную физическую природу образования и разные размеры и поэтому по-разному отражают ультразвуковые колебания и по-разному выявляются при контроле.

Основные дефекты сварных соединений, выполненных точечной контактной сваркой, также подразделяются на наружные и внутренние.

К наружным дефектам относят наружные трещины; прожог; наружный выплеск; вырыв точек; выход на поверхность литой структуры;

разрыв металла у кромки соединения; поверхностное нарушение сплошности металла; темную поверхность сварных точек; чрезмерную вмятину и неправильную форму вмятины от электрода.

Внутренними дефектами являются непровар; внутренние трещины, поры и раковины; внутренний выплеск металла; несимметричное расположение ядра сварной точки; чрезмерное проплавление.

Основным дефектом контактной стыковой сварки сопротивлением или оплавлением является слипание, при котором между свариваемыми деталями осуществляется механический контакт, но не происходит взаимодействие между атомами кристаллической структуры. Такой дефект довольно часто встречается при сварке давлением, трением и сварке взрывом. Обнаружить слипание физическими методами контроля сложно, для предупреждения появления подобного дефекта необходимо тщательно отслеживать соблюдение установленных параметров сварки: ток, напряжение, давление, время выдержки и скорость осадки.

При изготовлении паянных соединений в изделиях образуются следующие дефекты: дефекты заготовок и сборки изделия под пайку, дефекты паяных швов, дефекты готового паяного соединения.

Для получения хорошего качества паяной конструкции в первую очередь необходимо обеспечить качество изготовления заготовок и сборки под пайку. При сборке обращают внимание на установление необходимых зазоров и надежное закрепление соединяемых элементов изделия. Изделие, подлежащее пайке, после нанесения и закрепления припоя устанавливают в приспособление, гарантирующем полное затекание припоя в зазоры и наименьшее коробление конструкции.

Характерные дефекты сборки под пайку:

- неравномерность зазора между соединяемыми поверхностями;
- смещение элементов паяемого изделия.

Эти дефекты возникают вследствие неточной обработки заготовок; смещения последних в процессе их закрепления при сборке; отсутствия приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию изделия и отдельных его элементов.

Типичные дефекты паяных швов (соединений):

- непропай – несплошное заполнение зазора припоем, а также отсутствие связи между припоем и основным металлом;
- трещины;
- поры и раковины;
- шлаковые и флюсовые включения.

Непропай возникает в результате несмачивания паяемого металла припоем. Чтобы избежать непропаянных мест, необходимо тщательно удалить оксидную пленку и обеспечить установленные технологией пайки зазоры. Наличие вредных примесей в припоях отрицательно влияет на качество заполнения зазора. Жидкотекучесть припоев резко снижается при их загрязнении оксидами.

Трещины в паяных швах могут возникнуть под действием собственных напряжений в основном металле или вследствие вибраций паяемой конструкции в процессе пайки, когда закристаллизовавшийся припой недостаточно прочен. К образованию трещин склонны швы, спаянные припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации.

Мелкие поры, в том числе и непропаи, могут вызвать выделение в процессе пайки газов, содержащихся в припое и образующихся при испарении отдельных компонентов флюсов и припоев. Образованию усадочных раковин, пор и неспаев способствует также недостаточное количество внесенного при пайке припоя или слишком большой зазор. Наличие адсорбированного слоя влаги во флюсе и на прутках припоя также приводит к появлению пор и непропаев.

Шлаковые включения в паяном шве образуются вследствие плохой подготовки поверхности соединяемых элементов перед пайкой и наличия загрязнений (ржавчины, масла и т. д.), а также при длительном нагреве во время пайки, когда флюс, реагируя с основным металлом, переходит в шлак, плохо вытесняемый припоем. Избыток кислорода в пламени при пайке газовой горелкой – одна из причин образования шлаковых включений.

Влияние всех вышеперечисленных дефектов на работоспособность конструкции изделий зависит от их формы и расположения по отношению к направлению прилагаемых нагрузок при эксплуатации.

1.2. МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Современное машиностроение, особенно авиа и ракетостроение, предъявляют высокие требования к качеству применяемых материалов, а также к качеству изготовления деталей, сборочных узлов и изделий и прежде всего к их прочности и надежности. Эти требования обусловлены постоянно возрастающими напряженными условиями работы деталей и узлов изделий.

В современных конструкциях летательных аппаратов большая часть деталей работает при значительных статических нагрузках, часто

при повышенных температурах, подвергается знакопеременным вибрационным и ударным нагрузкам, циклическим температурным воздействиям, работает в условиях воздействия агрессивных сред или радиоактивного излучения.

Для изготовления таких деталей и узлов требуются высокопрочные, коррозионностойкие, жаропрочные металлические и неметаллические материалы: стали, цветные сплавы, композиционные материалы, обладающие повышенными удельными физико-механическими свойствами: пределом прочности, длительной прочностью, пределом выносливости, сопротивлением термической усталости и т. д.

Не говоря о дефектах кристаллического строения металлов, о дефектах, которые могут образовываться по границам блоков кристалла, в реальном металле встречаются еще более грубые дефекты, например, микроскопические трещины размером более 0,2 мкм. Такие микроскопические трещины резко снижают прочностные характеристики деталей.

Еще более грубыми являются дефекты микроскопические, видимые иногда невооруженным глазом, представляющие собой различного рода нарушения сплошности или однородности металла. Подобные дефекты могут стать причиной еще более значительного снижения прочности детали и даже ее разрушения. Выявлять своевременно подобные дефекты и призваны испытания образцов методами неразрушающего контроля.

В основу классификации методов неразрушающего контроля положены физические процессы взаимодействия излучения с объектом контроля. По физическим явлениям, на которых эти методы основаны, выделяют девять видов контроля: магнитный, электрический, вихре-токовый, радиоволновой, тепловой, визуально-оптический, радиационный, акустический и проникающими веществами (капиллярный).

Магнитный метод контроля основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий. Его применяют, как правило, для контроля объектов, выполненных из ферромагнитных материалов. При этом методе во всех случаях используют намагничивающие объекты и измеряют параметры, используемые при контроле магнитными методами. В зависимости от магнитных свойств материала (коэрцитивной силы, магнитной проницаемости, остаточной индукции), формы и размеров контролируемого изделия применяют два способа намагничивания:

- способ приложенного магнитного поля;
- способ остаточной намагниченности.

Информацию о магнитной проницаемости и ее изменении в зависимости от напряженности магнитного поля получают с помощью катушки индуктивности (индуктивный метод).

Для индцирования полей рассеяния на дефектах и измерения магнитных характеристик материалов также используют датчики типа феррозондов (феррозондовый метод), преобразователи Холла, магниторезисторы. Часто для регистрации полей рассеяния над дефектом применяют магнитные порошки или магнитные суспензии (магнитопорошковый метод).

Вихрековый метод (электромагнитный метод) основан на регистрации и анализе взаимодействия электромагнитного поля вихрекового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. Этим методом контролируют изделия из электропроводящих материалов.

Электрический метод НК заключается в регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом. Информативными параметрами являются электрическая емкость или потенциал. Емкостный вид метода применяют для контроля диэлектрических или полупроводниковых материалов. По изменению диэлектрической проницаемости контролируют химический состав пластмасс, полупроводников, наличие в них несплошностей, влажность сыпучих материалов и др. Потенциальный вид используют для контроля толщины проводящего слоя полупроводников, наличия в них несплошностей.

Радиоволновой метод НК основан на регистрации изменений параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом. Обычно применяют волны сверхвысокой частоты (СВЧ) длиной 1...100 мм и контролируют изделия из материалов, где радиоволны не очень сильно затухают: диэлектрики (пластмассы, керамика, стекловолокно), магнитодиэлектрики (ферриты), полупроводники, тонкостенные металлические объекты. Информативными параметрами являются амплитуда, фаза, вектор поляризации, частота, время распространения волн.

Тепловой метод НК заключается в регистрации изменения тепловых полей контролируемого объекта. Его применяют к объектам, выполненным из любых материалов и толщин.

Визуально-оптический метод НК основан на наблюдении и анализе параметров оптического излучения, взаимодействующего с контролируемым объектом. При визуальном контроле измеряемой характеристикой является изменение интенсивности света. Зрительно

контролируют исходные материалы, полуфабрикаты, готовую продукцию, обнаруживают отклонения формы и размеров валиков сварных швов, изъяны материала и обработки, поверхностные дефекты.

Однако возможности глаза ограничены, и поэтому применяют оптические приборы (лупы, эндо- и микроскопы), которые позволяют расширить пределы возможностей человеческого глаза. Визуальный контроль с применением оптических приборов называют визуально-оптическим. Он состоит в использовании явления отражения видимого света от исследуемого объекта.

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении в полость дефектов контролируемых объектов пробных веществ, в частности, индикаторной жидкости, хорошо смачивающей материал изделия. Их применяют для обнаружения слабо видимых невооруженным глазом поверхностных дефектов в изделиях любых материалов.

Методы течеискания используют для выявления только сквозных дефектов в замкнутых (герметичных) емкостях. В полость дефекта пробное вещество проникает под действием либо разности давлений, либо капиллярных сил. Регистрация прошедшего пробного вещества фиксируется определенным образом с наружной стороны изделия.

Радиационный метод НК основан на регистрации и анализе проникающего через объект ионизирующего излучения. Информативным признаком метода является ослабление интенсивности ионизирующего излучения. Этот метод применим к любым материалам и позволяет определить не только макродефекты, но и микроструктуру металлов.

Акустический метод НК заключается в регистрации параметров упругих волн, возбуждаемых или возникающих в объектах. Чаще всего используют упругие волны УЗ диапазона (с частотой колебаний $f > 20$ кГц). Этот метод называют еще УЗ. К акустическим методам относится акустическая эмиссия, когда в изделии возникают упругие колебания вследствие перестройки структуры, зарождения и развития дефектов, коррозионного растрескивания, пластического деформирования и др.

В зависимости от вида акустического метода (УЗ дефектоскопия, акустическая эмиссия) информативными признаками являются амплитуда, фаза, время распространения, число импульсов, амплитудно-частотный спектр, плотность сигналов и др.

При выборе метода НК детали или узла всегда необходимо учитывать характер или вид предполагаемого дефекта и его расположение, чувствительность возможного метода контроля, условия работы детали и технические условия на изделие, материал детали, состояние

поверхности, форму и размер детали, зоны предполагаемого контроля, доступность детали и совместимость предполагаемого метода НК и т. д.

В зависимости от происхождения дефекты различаются размерами, формой и средой, заполняющей их полости. Так, например, трещины имеют протяженную форму, различные раскрытие и глубину. В полости трещин могут быть оксиды, смазка, нагар и другие загрязнения. Для трещин характерны резкие очертания, острые углы, а неметаллические включения, закаты и заковы часто бывают округлой формы. Поэтому, учитывая особенности и несплошность материала, которую необходимо обнаружить, выбирают метод НК для ее надежного выявления.

Так, для обнаружения поверхностных трещин с малой шириной раскрытия (0,5...5 мкм) на деталях, изготовленных из ферромагнитных материалов, наиболее эффективен магнитный метод, а из немагнитных материалов – вихретоковый или капиллярный метод, и совершенно непригоден, например, радиографический. Для выявления внутренних скрытых дефектов целесообразно применять радиационные или ультразвуковые методы.

Чувствительность методов НК определяется наименьшими размерами выявляемых несплошностей:

- у поверхностных – шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяженностью в глубь металла и по поверхности изделия;
- у внутренних – размерами несплошности с указанием глубины залегания.

Чувствительность зависит от физических особенностей метода НК, технических параметров применяемых средств контроля, чистоты обработки поверхности контролируемой детали, толщины детали, физико-химических свойств ее материала, условий контроля и других факторов. Оценочные данные о чувствительности некоторых методов приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Чувствительность методов НК

Метод	Минимальные размеры выявляемых несплошностей, мкм		
	Ширина раскрытия	Глубина	Протяженность
Визуально-оптический	5...10	–	100
Цветной	1...2	10...30	100...300

Метод	Минимальные размеры выявляемых несплошностей, мкм		
	Ширина раскрытия	Глубина	Протяженность
Люминесцентный	1...2	10...30	100...300
Магнитопорошковый	1	10...50	30
Вихретоковый	0,5...1	150...200	600...2000
УЗ	1...30	–	
Радиографический	100...500	1...1,5 от толщины	–

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основные виды дефектов могут образоваться при сварке плавлением.
2. Дефекты какого вида лучше всего выявляются при ультразвуковом контроле?
3. Какие дефекты могут быть при контактной точечной сварке?
4. Назовите основной дефект, который может появиться при контактной стыковой сварке.
5. Перечислите типичные дефекты паянных соединений.
6. Какие основные виды дефектов могут образоваться при сварке плавлением?
7. Дефекты какого вида лучше всего выявляются при ультразвуковом контроле?
8. Какие дефекты могут возникать при контактной точечной сварке?
9. Назовите основной дефект, который может появиться при контактной стыковой сварке.
10. Перечислите типичные дефекты паянных соединений.
11. Что называют чувствительностью метода контроля?
12. Чем следует руководствоваться при выборе метода контроля?
13. Расскажите о неразрушающих методах контроля.

2. ВЫБОР МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

В зависимости от места расположения возможных дефектов их можно условно поделить на поверхностные, подповерхностные с глубиной от 0,5 до 1,0 мм и внутренние с глубиной залегания более 1,0 мм. Для выявления поверхностных дефектов применимы все методы, но, как правило, наиболее эффективны из них визуально-оптический, магнитопорошковый и капиллярный. Для обнаружения подповерхностных несплошностей эффективны УЗ, вихретоковый, магнитопорошковый, а внутренних – только методы УЗ и радиографический.

Условия эксплуатации детали определяют наиболее вероятные места возникновения дефектов, связанных с повышенной концентрацией напряжений, воздействием знакопеременных нагрузок, агрессивных сред, температурных воздействий. Также любые конструктивные или технологические дефекты могут стать очагами усталостного разрушения. Критические места конструкции изделия позволяют выявить контроль неразрушающими методами.

Технические условия (ТУ) изделия включают в себя технические требования к основным параметрам и характеристикам, тем самым определяют количественные критерии недопустимости в нем разного рода дефектов.

При этом в разных частях конструкции изделия могут быть различные требования к качеству тех или иных деталей. К тому же в ТУ указывают и методы контроля, которые необходимо применять на данном изделии. Требования о применении различных методов НК могут быть изложены и в других документах: технологических и конструкторских.

Физические свойства материалов имеют важнейшее значение при выборе методов НК. Для применения магнитного метода материал должен быть ферромагнитным и однородным по магнитным свойствам структуры. Вихретоковый метод контроля используется, если материал электропроводен, однороден по структуре и изотропен по магнитным свойствам. Для УЗ контроля материал должен обладать хорошими характеристиками упругости.

Капиллярные методы оправданы при непористом и стойком к воздействию органических растворителей материале. Применение методов просвечивания ионизирующими излучениями ограничивается лишь способностью материала поглощать данные излучения и толщиной материала.

Применение некоторых методов для контроля изделий сложной формы ограничено, например, ультразвукового метода – из-за трудности расшифровки результатов контроля и наличия мертвых зон, а капиллярного – из-за трудности выполнения отдельных операций, особенно подготовки деталей к контролю и удаления с поверхности проникающей жидкости.

Крупногабаритные изделия контролируют, если позволяет конструкция, по частям.

При определении зоны контроля обращают внимание на отсутствие в ней конструктивных элементов, мешающих проведению того или иного метода НК, например, при контроле УЗ наличие отверстий, заклепок болтов и т. д.

Состояние и степень шероховатости поверхности очень сильно влияют на выбор метода контроля. Чувствительность методов НК, особенно магнитопорошкового, капиллярных, УЗ зависит от степени шероховатости поверхности, наличия на ней различных защитных покрытий. Капиллярные методы не могут быть выполнены по лакокрасочным покрытиям. Вихретоковый контроль возможен при наличии покрытий толщиной 0,2...0,5 мм. УЗ контроль, например сварных соединений, проводят при шероховатости меньше Rz 40 мкм.

Условия контроля и наличие доступа к объекту контроля также сильно влияют на выбор метода НК. Как правило, НК выполняется при температуре *выше* 0 °С. Зона контроля должна быть ограждена от источников загрязнения (например, от пыли зачистных машинок), а условия контроля быть безопасными, чтобы внимание дефектоскописта было в полной мере направлено на объект контроля.

Большинство методов НК может быть применимо для контроля при доступе к детали с одной стороны. Метод просвечивания ионизирующими излучениями требует доступа с двух сторон детали.

Методы НК выбирают с учетом перечисленных факторов. Очень часто применения одного метода недостаточно для проверки качества изделия по требуемым параметрам. В таких случаях используют комплекс методов НК.

Например, при радиографическом контроле сварных соединений хорошо выявляются объемные несплошности (поры, шлаковые включения) и плоскостные дефекты с ориентацией, близкой к направлению просвечивания, и раскрытием более 100 мкм. УЗ контроль хуже выявляет объемные дефекты, зато позволяет обнаруживать плоскостные дефекты с раскрытием менее 100 мкм. Сочетание этих методов при контроле ответственных металлоконструкций дает возможность выявить все опасные дефекты указанных типов.

Для обслуживающего персонала наиболее опасны радиационные методы. Определенную токсичность имеют методы капиллярные и течеискания при использовании некоторых типов пробных веществ и ультрафиолетовых осветителей. Заметного влияния остальных методов на здоровье обслуживающего персонала не установлено.

По возможностям автоматизации контроля наиболее благоприятны вихретоковый вид контроля, магнитные методы с феррозондовыми, индукционными и тому подобными типами преобразователей, радиационный радиометрический метод и некоторые виды тепловых.

Главные их преимущества заключаются в отсутствии необходимости прямого контакта преобразователя с изделием и представлении информации о дефектах в виде показаний приборов. Перечисленным методам уступает УЗ контроль, для которого обязателен акустический контакт преобразователей с изделием, например через слой воды. Трудность автоматизации других методов заключается в необходимости визуальной обработки данных о дефектах, которые эти методы выявляют.

По стоимости выполнения контроля к наиболее дорогим относятся методы радиографические и течеискания. Это связано с длительностью операций контроля, а также необходимостью капитальных затрат на оборудование и помещения. Низкой производительностью также отличается капиллярный контроль. Если сравнивать, например, затраты на радиационный и УЗ контроль сварных соединений толщиной 10...20 мм, то для УЗ контроля они будут в 3...5 раз меньше.

Обобщая все сказанное, необходимо заметить, что при сопоставлении методов НК и при выборе конкретного метода наиболее важной характеристикой является возможность обнаружить дефект (рис. 2.1).

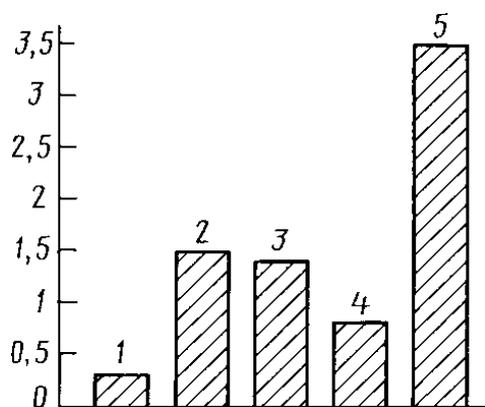


Рис. 2.1. Сравнительная выявляемость дефектов различными методами контроля: 1 – визуально-оптическим; 2 – рентгенографическими; 3 – магнитными; 4 – капиллярными; 5 – УЗ контроль

По данным отечественных и зарубежных исследователей, выявляемость дефектов капиллярным и визуальным методами составляет

0,2; рентгено- и гаммаграфический методы характеризуются оценкой, близкой к 1,7. В то же время для УЗ метода этот коэффициент $> 3,0$.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие виды контроля применяют при оценке качества изделий машиностроения?
2. Опишите основной принцип выбора метода неразрушающего контроля?
3. В каком техническом документе содержатся требования к методам контроля?
4. Охарактеризуйте возможности и преимущества тех или иных методов НК.
5. Расскажите о выявляемости дефектов различными методами контроля.

3. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Метод визуально-оптического контроля является наиболее простым, требующим наименьшей затраты времени и сравнительно недорогим. В результате внешнего осмотра оператор может обнаружить трещины, поверхностную пористость, незаполненные кратеры, подрезы, смещения, прожоги и выплески при контактной сварке и др. Минимальный размер дефекта, который выявляется при визуальном контроле без дополнительных вспомогательных средств, зависит от характера исследуемой поверхности, уровня яркости и контраста яркостей между изделием и фоном. Чувствительность человеческого глаза меняется в широких пределах в зависимости от длины волны воспринимаемого света. В обычных условиях глаз наиболее чувствителен к желто-зеленому цвету с длиной волны $\lambda \sim 550$ нм. Человеческий глаз удовлетворительно работает в широком диапазоне условий, и именно по этой причине при зрительном восприятии трудно судить о разности яркости или интенсивности. Время, в течение которого должен работать оператор, необходимо ограничивать, чтобы избежать обусловленного этим утомления глаз. Важно, чтобы количество света, достигающего глаз, было достаточным для наилучшей различимости дефектов.

Многочисленными экспериментами установлено, что наибольшая световая чувствительность глаза достигается при освещенности в пределах 250...500 лк.

Ограниченность остроты и чувствительности глаза компенсируется применением вспомогательных оптических приборов. К ним относят зеркала, линзы, лупы, микроскопы, телескопические системы, эндоскопы. Одним из наиболее простых способов контроля недоступных или скрытых поверхностей является осмотр их с помощью зеркал. Зеркальная поверхность должна быть совершенно плоской, так как лишь при этом условии обеспечивается хорошая четкость изображения. Необходимо, кроме того, чтобы зеркала были чистыми и свободными от пыли.

Для визуального контроля мелких и близко расположенных объектов, т. е. деталей и изделий, находящихся от глаза оператора на расстоянии наилучшего зрения (250 мм), применяют лупу (собирающую линзу). Для максимального использования возможности лупы, ее всегда следует держать так, чтобы плоскость лупы была параллельна поверхности контролируемого изделия и находилась как можно

ближе к глазу. В этом случае глаз воспринимает наибольшее количество отраженного от поверхности изделия света.

Микроскоп, как и лупа, предназначен для наблюдения близко-расположенных (~ 250 мм) предметов. Изучение распространения первичной макроскопической трещины, когда возникновение трещин равновероятно во многих его точках, применяют микроскопы с увеличением в 2...20 раз. Для исследования движения усталостной макротрещины и определения влияния на эти процессы границ зерен требуются микроскопы с увеличением в 100 ... 500 раз. При визуальном контроле далеко расположенных объектов, например отливок, изделий аэрокосмической техники, широко применяют телескопические системы (лупы, бинокли). В этих системах параллельный пучок излучения поступает во входной зрачок системы, далее этот пучок сжимается, оставаясь параллельным, и выходит через выходной зрачок. Фокусы таких систем находятся в бесконечности, а оптическая сила равна нулю.

Эндоскопы – это смотровые приборы, построенные на базе волоконной и линзовой оптики и механических устройств. Принцип действия эндоскопов заключается в осмотре объекта контроля с помощью специальной оптической системы (часто типа микроскопа, телескопа), позволяющей передавать изображение на значительные расстояния (до нескольких десятков метров) с отношением эффективной длины эндоскопа X (вводимой в объект контроля части корпуса) к его наружному диаметру d , много большим единицы ($X / d \gg 1$).

Современный эндоскоп является универсальным оптико-механическим прибором, обеспечивающим любой вид визуального контроля внутри закрытого пространства на значительное расстояние (до 30 м). Эндоскопы широко применяют в авиационно-космической промышленности для диагностики сварных швов в закрытых камерах сгорания, для определения усталостных трещин в лонжеронах крыльев, наличия коррозии в заклепках. Достаточно широко используют эндоскопы в атомной, нефтехимической промышленности, а также в автомобильной промышленности при диагностике двигателей.

Измерительный контроль деталей и узлов также достаточно прост и доступен. Теоретические и практические вопросы измерительного контроля в данном учебном пособии не рассмотрены, они достаточно подробно освещены в других учебных курсах: «Физические основы теории измерений», «Метрологическое обеспечение производства» и др.

Контрольные вопросы и задания

1. В чем заключается преимущество визуально-оптического контроля?
2. Какие дополнительные средства измерений применяют при визуальном контроле?
3. Какие требования предъявляются по условиям работы оператора при визуальном контроле?
4. Расскажите об эндоскопах и их применении.
5. Расскажите о возможности применения микроскопов при визуальном контроле.

4. РАДИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

4.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАДИАЦИОННОМ КОНТРОЛЕ

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования информации о наличии в изделии дефектов, но все они основаны на просвечивании изделий разными видами ионизирующих излучений.

При радиационном контроле используют три основных элемента (рис. 4.1): источник ионизирующего излучения; контролируемый объект; рентгеновский детектор, регистрирующий прошедшее ионизирующее излучение.

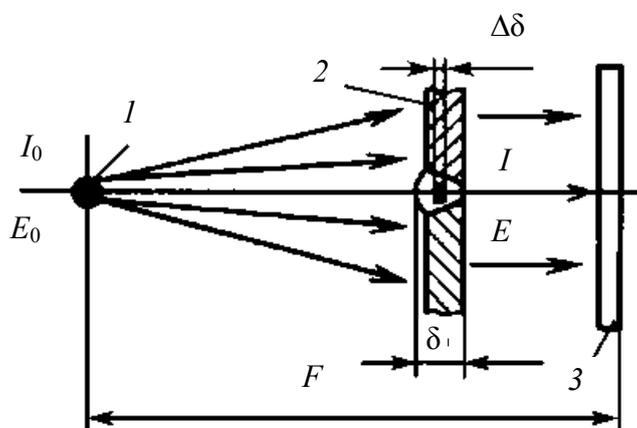


Рис. 4.1. Схема просвечивания:
I – источник; 2 – изделие; 3 – детектор;
F – фокусное расстояние; δ – толщина контролируемого объекта; $\Delta\delta$ – размер дефекта; *I* – интенсивность излучения; *E* – энергия излучения

При радиационной дефектоскопии в основном применяют тормозное (рентгеновское), нейтронное и гамма-излучения. Тормозное и гамма-излучения представляют собой разновидность электромагнитных колебаний, которые, по сравнению с видимым светом и ультрафиолетовым излучением, имеют как общие волновые свойства, так и специфические особенности, связанные с их корпускулярными (квантовыми) свойствами. В частности, длина волны видимого света равна $10^{-9} \dots 4,10^{-7}$; рентгеновского излучения $6 \cdot 10^{-13} \dots 10^{-8}$; гамма-излучения $10^{-13} \dots 4,10^{-12}$ м.

Разница между рентгеновским и гамма-излучением заключается в механизме их возникновения: рентгеновское излучение – внеядерное происхождение, гамма-излучение – продукт распада ядер.

Рентгеновское излучение, открытое в 1895 г. немецким физиком Рентгеном, получают чаще всего с помощью электронных рентгеновских трубок (рис. 4.2).

Рентгеновская трубка представляет собой стеклянный баллон с высокой степенью разрежения газа ($10^{-6} \dots 10^{-7}$ мм рт. ст.). В трубке впаяны электроды – анод А и катод К. Катод служит источником электронов, анод – мишенью для их торможения. Катод изготавливают в виде спирали из вольфрамовой проволоки, а анод – из вольфрамовой пластинки. Анод впаявают в пустотелый медный стержень, который во время работы охлаждается.

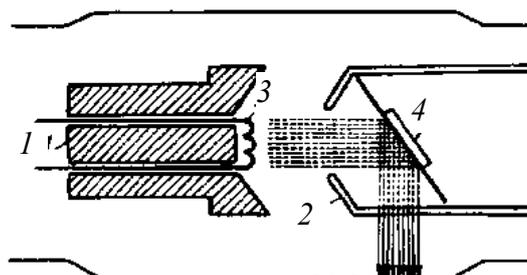


Рис. 4.2. Схема рентгеновской трубки:
1 – катод; 2 – фокусирующие электроды;
3 – нить накала; 4 – анод

Спираль катода при работе нагревается до температуры около $3\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для создания определенной направленности в движении электронов и придания им необходимой скорости к электродам трубки прикладывают высокое напряжение с разностью потенциалов порядка нескольких десятков или сотен киловольт.

Кинетическая энергия электронов, попадающих на анод, находится в прямой зависимости от напряжения, приложенного к трубке. При соударении движущихся с большой скоростью электронов с атомами материала анода движение электронов резко замедляется, при этом теряется кинетическая энергия, которая частично превращается в лучистую энергию, выделяемую в виде фотонов рентгеновского излучения, а частично тратится на нагревание анода.

Эта часть энергии E зависит от анодного напряжения U и порядкового номера материала анода Z :

$$E = 1,14 \cdot 10^{-7} ZU. \quad (4.1)$$

Например, при использовании вольфрамового анода и напряжении на трубке 60 кВ в энергию рентгеновского излучения превращается немногим более 0,1 % энергии тормозящихся электронов. При напряжении 100 кВ КПД трубки увеличивается до 1 %. При 2 МэВ он достигает 10 %, а при 15 МэВ – более 50 %.

Из квантовой теории известно, что при атомарных процессах некоторое количество энергии движения может быть приравнено одному кванту лучистой энергии, в частности, кинетическая энергия одного электрона, движущегося со скоростью v , будет равна одному кванту:

$$mv^2/2 = h\nu, \quad (4.2)$$

где m – масса электрона, ν – частота следования квантов.

В рентгеновской трубке электроны, попадающие на анод с некоторой скоростью v , сообщаемой им электрическим полем достаточно высокого напряжения, задерживаются поверхностью анода, тормозятся в нем и теряют свою скорость, а значит, и кинетическую энергию. За счет этой потерянной кинетической энергии электрона возникает другая форма энергии – рентгеновское излучение (квант $h\nu$).

Полученное таким образом рентгеновское излучение характеризуется двумя самостоятельными энергетическими спектрами: непрерывным (тормозное излучение) и линейчатым (характеристическое излучение) (рис. 4.3).

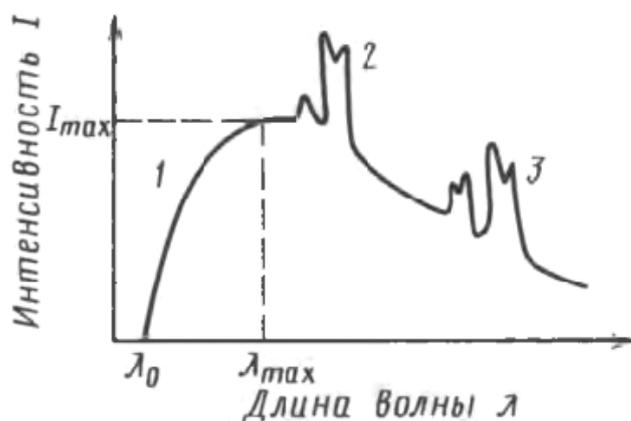


Рис. 4.3. Спектры излучения рентгеновской трубки: 1 – непрерывный спектр; 2 и 3 – K- и L-серии характеристического излучения; λ_0 – длина волны, при которой интенсивность излучения становится равной нулю; λ_{\max} – длина волны, при которой интенсивность рентгеновского тормозного излучения максимальна; I_{\max} – максимальное значение интенсивности рентгеновского тормозного излучения

Характеристическое излучение с линейным спектром возникает только в том случае, когда быстрые электроны, взаимодействующие с веществом анода, обладают большой энергией, например достаточной

для обеспечения перехода K -электронов атомов вещества анода на более высокие энергетические уровни. Тогда происходит мгновенный обратный переход электрона, например, с L -оболочки на K -оболочку. Это сопровождается характеристическим излучением с частотой ν , соответствующей разности энергий между уровнями E_K и E_L :

$$AE = E_K - E_L = h\nu. \quad (4.3)$$

Характеристическое излучение используют при рентгеноспектральном и рентгеноструктурном анализе состава вещества. Поскольку каждый элемент Периодической системы элементов Д. И. Менделеева обладает вполне определенными энергиями связи электронов на оболочках атома, то, следовательно, каждому веществу соответствует вполне определенный линейчатый спектр.

Тормозное излучение с непрерывным (сплошным) спектром возникает в результате «постепенного» торможения в материале анода электронов разных энергий, испускаемых катодом. Кинетическая энергия E электрона у поверхности анода рассчитывается по уравнению

$$E = eU, \quad (4.4)$$

где e – заряд электрона ($e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл); U – анодное напряжение трубки, В.

В связи с тем, что скорости электронов распределены по закону Максвелла, эти электроны тормозятся постепенно по толщине анода. Поэтому в рентгеновском спектре излучения, генерируемого трубкой, присутствуют кванты со всевозможными энергиями. Полный переход кинетической энергии электронов E в максимальную энергию рентгеновского излучения $E_{\text{тах}}$ происходит при минимальной длине волны.

Следовательно, с увеличением анодного напряжения U длина волны уменьшается, что, соответственно, приводит к изменению спектрального состава и к повышению максимальной энергии непрерывного спектра (рис. 4.4).

С увеличением тока трубки при постоянном напряжении увеличивается интенсивность излучения (рис. 4.4, а) без изменения спектрального состава непрерывного спектра. Увеличение ускоряющего напряжения при заданном анодном токе изменяет спектр излучения со смещением максимума излучения в сторону коротких волн (рис 4.4, б).

Экспозиционная доза рентгеновского излучения X пропорциональна току трубки и времени просвечивания t :

$$X = it. \quad (4.5)$$

Для рентгеновской трубки ее КПД пропорционален анодному напряжению U и в зависимости от него составляет 1...2 % от полной энергии всех электронов, тормозящихся на аноде.

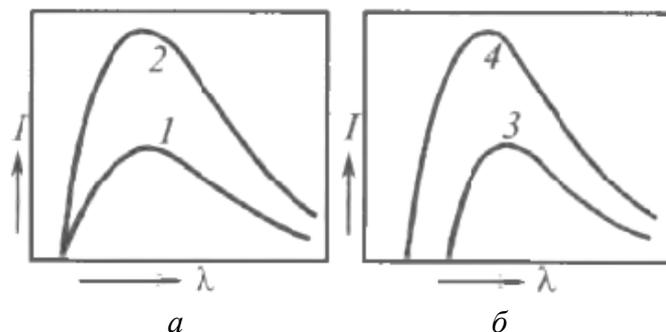


Рис. 4.4. Зависимость интенсивности рентгеновского излучения от тока (а) и напряжения (б):
 1 – малый ток; 2 – большой ток; 3 – низкое напряжение; 4 – высокое ускоряющее напряжение

Если рентгеновское излучение возникает в результате торможения быстролетающих электронов, то гамма-излучение – это результат ядерных превращений, возникающий при переходе ядра из одного энергетического состояния в другое. Суть процессов заключается в следующем.

Химические элементы состоят из атомов, отличающихся друг от друга числом нейтронов N_N в ядре. Такие атомы называют *изотопами*.

Атомы, ядра которых отличаются по составу, т. е. содержат различное число протонов или нейтронов либо тех и других одновременно, называют *нуклидами*. Таким образом, разные изотопы одного и того же химического элемента являются нуклидами, отличающимися только числом нейтронов.

Между одноименно заряженными частицами ядра (протонами) действуют силы электростатического отталкивания. С увеличением атомного номера элемента (числа протонов в ядре) электростатические силы отталкивания действуют все сильнее. У тяжелых элементов (с $Z > 82$) ядерные силы уже не могут обеспечивать устойчивость ядер, и начинается самопроизвольное превращение неустойчивых изотопов в более устойчивые (обычно в изотопы другого элемента). Это явление называют *радиоактивностью*, или *радиоактивным распадом*. Радиоактивный распад ядер сопровождается испусканием альфа- и бета-частиц (альфа- и бета-излучением) и квантов гамма-излучения.

Альфа-частицы представляют собой ядра гелия, состоящие из двух протонов и двух нейтронов. Они несут положительный заряд, равный 2 ед. заряда, отклоняются в магнитном и электрическом полях. Пробег альфа-частиц в веществе мал, в воздухе достигает 11 см, в биологической ткани – 0,1 мм; они полностью поглощаются слоем алюминия, равным 0,01 мм.

Бета-частицы – это электроны, которые обладают разной энергией (от нуля до максимума) и излучают непрерывный спектр. Под действием магнитного и электрического полей они отклоняются от прямолинейного направления (пробег их в воздухе достигает 10 м, в биологической ткани – 10...12 мм) и полностью поглощаются 6-миллиметровым листом из алюминиевого сплава или слоем свинца толщиной 1 мм.

Гамма-излучение представляет собой фотонное излучение с *линейчатым* спектром с очень короткой длиной волны ($\sim 0,1$ нм) и без заряда. Магнитным и электрическим полями оно не отклоняется. Гамма-излучение может проникать через стальные изделия толщиной до 500 мм.

В промышленности гамма-излучение получают с помощью радиоизотопных источников, использующих радиоактивный распад изотопов кобальта, цезия, селена и др. Источник излучения является основным элементом гамма-дефектоскопа. Конструктивно различают два вида гамма-дефектоскопов: шланговые и затворные.

В шланговых дефектоскопах ампула с радионуклидом находится внутри радиационной головки только во время проведения контроля. После завершения работы ампулу перемещают в другой специально предназначенный для хранения радионуклидов контейнер по ампулопроводу (шлангу). Дефектоскопы снабжаются набором источников с различными размерами активной части. Такие дефектоскопы обычно универсальны.

В затворных дефектоскопах ампула находится внутри радиационной головки постоянно. Включение и выключение происходит с помощью специальной шторки (затвора). Затворные дефектоскопы предназначены для фронтального и панорамного просвечивания. Такие дефектоскопы обычно являются специализированными.

Гамма-дефектоскопы конструктивно просты, надежны и достаточно мобильны. В качестве защитных средств радиационных головок применяют материалы большой плотности: свинец, сплавы на основе вольфрама, обедненный уран или их комбинации.

Единицей измерения энергии ионизирующего излучения в Международной системе единиц измерения (СИ) служит джоуль (Дж). 1 Дж эквивалентен механической работе силы в 1 Н, перемещающей тело на расстояние 1 м в направлении действия силы.

Часто энергию рентгеновского и гамма-излучений выражают в килоэлектрон-вольтах (кэВ) или мегаэлектрон-вольтах (МэВ). Электрон-вольт равен энергии, которую приобретает заряженная частица, несущая один элементарный заряд (заряд электрона), при перемещении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов в 1 В.

Активность радиоактивного изотопа в источнике (любом объекте, содержащем какое-либо количество радиоактивного вещества) определяется числом атомов, распадающихся в единицу времени. Активность радиоактивного изотопа равна произведению постоянной распада w_p на общее число радиоактивных атомов (N): $A = w_p \cdot N$.

Активность изотопа в источнике определяется числом распадов в секунду и в системе СИ измеряется в беккерелях (Бк). На практике широко применяют внесистемную единицу активности – кюри (Ки). Кюри – активность такого количества радиоактивного вещества, в котором происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду. Столько распадов в секунду происходит в 1 г радия.

Отношение активности изотопа в радиоактивном источнике к массе или объему источника называют, соответственно, *удельной* или *объемной активностью изотопа*.

Из определения активности следует, что чем больше радиоактивного вещества находится в источнике, тем выше активность источника, и чем дольше период полураспада изотопа, тем больше радиоактивного вещества необходимо брать для получения данной активности. Например, активностью в 1 Ки обладает источник со стронцием ^{90}Sr , в котором находится $< 0,01$ г радиоактивного вещества, в то же время для получения такой же активности источника с ураном ^{238}U потребовалось бы > 1 т природного урана.

Интенсивностью ионизирующего излучения (или плотностью потока энергии) называют энергию излучения, падающую в единицу времени на единицу площади, расположенной перпендикулярно к направлению излучения. Служит $\text{Вт}/\text{м}^2$ единицей интенсивности. $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ эквивалентен энергии излучения в 1 Дж, падающей на поверхность площадью 1 м^2 в течение 1 с.

В радиационной дефектоскопии для большей части расчетов можно принять рентгеновский излучатель или источник гамма-излучения за точечный источник, т. е. за такой источник излучения, линейные размеры которого значительно меньше расстояния между ними и местом регистрации излучения. В таком случае к источникам рентгеновского и гамма-излучений применим закон, согласно которому интенсивность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника.

Для оценки действия ионизирующего излучения в какой-либо среде служат так называемые дозовые характеристики поля излучения. Одна из этих характеристик – *поглощенная доза излучения* D_n – представляет собой энергию ионизирующего излучения, отнесенную к единице массы облучаемого вещества. Единицей поглощенной дозы является грэй (Гр). 1 Гр – это доза излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия ионизирующего излучения в 1 Дж. Внесистемная единица поглощенной дозы – это радиан (рад).

Мощностью поглощенной дозы называют дозу, поглощенную в единицу времени. За единицу мощности поглощенной дозы любого вида ионизирующего излучения принят Гр/с, внесистемная единица – рад/с.

Эквивалентная доза излучения определяет биологическое воздействие излучения на организм человека. Эквивалентная доза излучения равна произведению поглощенной дозы D_n излучения в биологической ткани на коэффициент качества K этого излучения: $D_{ЗКВ} = KD_n$. Коэффициент качества K служит для сравнения различных видов ионизирующего излучения по ожидаемому биологическому эффекту. Например, для рентгеновского и гамма-излучений $K = 1$; для потока нейтронов с энергией до 10 МэВ $K = 10$, а для альфа-излучений с энергией до 10 МэВ $K = 20$. За единицу эквивалентной дозы излучения принят зиверт (Зв). Внесистемная единица эквивалентной дозы – бэр. 1 бэр численно равен 1 рад, деленному на коэффициент качества K . Единицами мощности эквивалентной дозы излучения являются эВ/с и бэр/с.

Экспозиционная доза – характеристика, основанная на ионизирующем действии излучения в сухом атмосферном воздухе. Единицей экспозиционной дозы служит Кл/кг. 1 Кл/кг соответствует экспозиционной дозе рентгеновского или гамма-излучения, при прохождении которого через 1 кг воздуха в результате всех ионизационных процессов в воздухе образуются ионы, несущие заряд в 1 Кл электричества каждого знака.

Внесистемная единица экспозиционной дозы – рентген (Р). Рентген – это экспозиционная доза рентгеновского и гамма-излучений, при прохождении которых через $1,293 \cdot 10^{-3}$ г воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие заряд в одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака ($1,293 \cdot 10^{-3}$ г – это масса 1 см^3 атмосферного воздуха при 0°C и давлении 1013 ГПа).

Мощность экспозиционной дозы (МЭД), т. е. экспозиционная доза излучения, отнесенная к единице времени, выражается в А/кг или Р/с. 1 А/кг равен МЭД рентгеновского и гамма-излучений, при которой за 1 с сухому атмосферному воздуху передается экспозиционная доза 1 Кл/кг.

Понятие «гамма-эквивалент», или «радиевый гамма-эквивалент», не установлено стандартами, однако эти характеристики источников гамма-излучения широко используют при решении многих практических задач.

Если два источника гамма-излучения при одинаковых условиях измерения создают одинаковую МЭД, то они имеют одинаковый гамма-эквивалент.

Измерениями установлено, что 1 мг Ra в виде точечного источника, помещенного в фильтр из платины толщиной 0,5 мм, создает на расстоянии 1 см МЭД, равную 0,4 Р/ч. Эта величина названа ионизационной постоянной, или гамма-постоянной Γ , радия. Каждый изотоп имеет свою гамма-постоянную, показывающую, какую МЭД гамма-излучения создает точечный источник данного изотопа, активность которого 1 мКи на расстоянии 1 см в течение 1 ч. Единица измерения гамма-постоянной $\text{Р} \cdot \text{см}^2 / (\text{ч} \cdot \text{мКи})$.

Гамма-постоянная зависит от схемы радиоактивного распада изотопов, т. е. от числа гамма-квантов, приходящихся на один распад, и их энергии. Некоторые радиоактивные изотопы испускают кванты одинаковой энергии, например ^{137}Cs , у которого энергия квантов равна 0,001 МэВ. Такое излучение называют многоэнергетическим (монохроматическим), а его спектр графически представляют в виде одной линии. Большая часть изотопов испускает кванты различных энергий, например, спектр излучения ^{60}Co состоит из двух основных линий, соответствующих энергиям 1,17 и 1,33 МэВ, спектр излучения ^{192}Ir имеет 10 основных линий и т. д.

Соотношение между гамма-эквивалентом M точечного источника и излучения и экспозиционной дозой D , создаваемой источником на расстоянии r , описывается выражением

$$D = 8,4 Mt/r^2, \quad (4.6)$$

где t – время облучения, ч; 8,4 – гамма-постоянная радия.

Ионизирующие излучения по своей природе являются электромагнитными. Их проникающая способность определяется энергией, зависящей от длины волны. Чем меньше длина волны, тем выше энергия излучения и выше проникающая способность излучения.

Выявление внутренних дефектов при просвечивании основано на способности ионизирующего излучения неодинаково проникать через различные материалы и поглощаться в них в зависимости от толщины, рода (плотности) материалов и энергии излучения. Для выявления дефектов в изделиях с одной стороны устанавливают источник излучения, с другой – детектор, регистрирующий информацию о внутреннем строении контролируемого объекта (рис. 4.5).

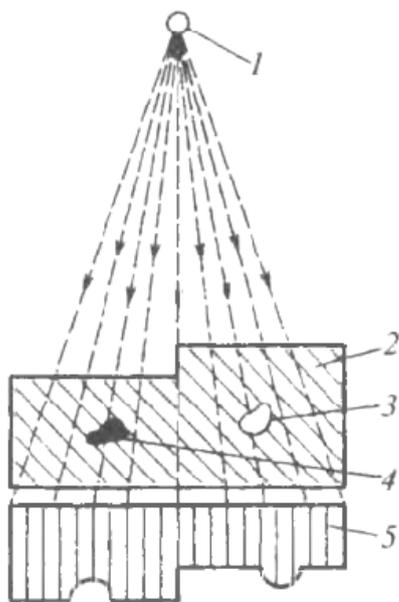


Рис. 4.5. Схема просвечивания изделия рентгеновским или гамма-излучением:
 1 – источник; 2 – контролируемый объект;
 3 – раковина; 4 – шлаковое включение;
 5 – эпюра интенсивности излучения за объектом

Излучение от источника 1 проходит через изделие 2 , имеющее внутренние дефекты 3 , 4 , с разной плотностью. В дефектном и бездефектном местах оно будет поглощаться по-разному и выходить на детектор с разной интенсивностью 5 . Интенсивность излучения при прохождении через дефект 3 , заполненный воздухом или газом, ослабляется меньше, чем в сплошном металле, а сильнее – над дефектом 4 , заполненным более плотным материалом (например, вольфрамом), чем основной.

4.2. КЛАССИФИКАЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Разность интенсивностей будет зарегистрирована детектором. В зависимости от вида применяемого детектора различают три основных метода радиационного контроля: радиографический, радиоскопический и радиометрический (рис. 4.6). *Радиографические методы* радиационного НК основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографический снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документальным подтверждением полученных результатов.

В зависимости от используемых детекторов различают пленочную радиографию и ксерорадиографию (электрорадиографию). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фоточувствительная пленка, во втором – полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

В зависимости от используемого излучения различают несколько разновидностей промышленной радиографии: рентгенографию, гаммаграфию, ускорительную и нейтронную радиографию (рис.4.7). Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

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

Чувствительность этого метода несколько меньше, чем радиографии, но его преимуществами являются экспрессность и непрерывность контроля.

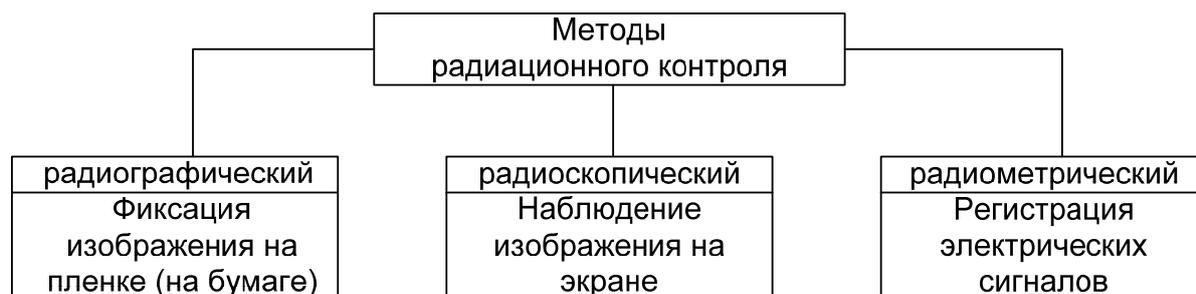


Рис. 4.6. Классификация методов радиационного контроля

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

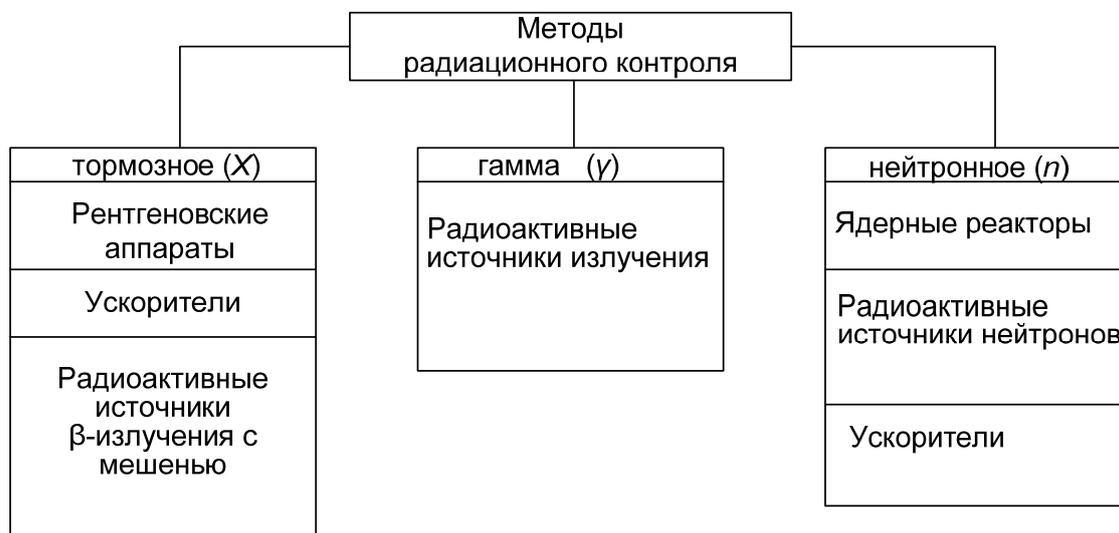


Рис. 4.7. Классификация источников ионизирующих излучений

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

Самыми распространенными источниками ионизирующего излучения, применяемыми в радиационных методах НК, являются рентгеновские аппараты. Рентгеновский аппарат состоит из рентгеновского излучателя, источника высокого напряжения и пульта управления. Высоковольтный генератор преобразует напряжение сети в напряжение питания рентгеновской трубки. Высоковольтный генератор включает в себя преобразователи переменного тока в постоянный (диоды кенотронов), конденсаторы для фильтрации и удваивания напряжения, трансформаторы накала рентгеновской трубки, трансформаторы накала кенотронов, выключатели и защитные устройства.

Пульт управления представляет собой группу приборов, которые служат для измерения и регулирования времени, тока, напряжения и частоты.

Основным элементом рентгеновского аппарата является рентгеновская трубка. В настоящее время в них используют металлокерамику,

для охлаждения применяют воздух или специальный газ. Благодаря этому трубки оказываются более габаритными, однако более долговечными.

Для характеристики оптических свойств рентгеновских трубок вводят понятия действительного и эффективного фокусных пятен трубки. *Действительным фокусным пятном* называют участок поверхности мишени, на котором преимущественно тормозится пучок электронов. *Эффективным фокусным пятном*, или *оптическим фокусом*, именуют проекцию действительного фокусного пятна в направлении оси рабочего пучка излучения на плоскость, перпендикулярную к этой оси.

Различают трубки с круглым и линейным (с отношением сторон не более 1,25) оптическими фокусами. Круглый фокус получают с помощью нити накала в виде плоской архимедовой спирали, линейный – посредством нити накала в форме цилиндрической спирали.

Для улучшения четкости изображения на рентгенограммах желательно иметь фокусные пятна возможно меньших размеров. В то же время уменьшение размеров действительного фокусного пятна при данной эффективности системы охлаждения анода ведет к снижению мощности рентгеновской трубки (рис. 4.8). Это вызвано тем, что удельная электрическая нагрузка на фокусное пятно, т. е. мощность, приходящаяся на единицу его площади, ограничена. Например, для медного анода с вольфрамовой мишенью удельная нагрузка не может превышать 2200...2500 Вт/(мм² · с). Поэтому широко применяют трубки с линейным фокусом, в которых можно получить оптический фокус, значительно меньший действительного по величине. В этих трубках действительное фокусное пятно имеет форму прямоугольника, в то время как оптический фокус представляет собой квадрат. Электрические свойства рентгеновской трубки характеризуются анодным напряжением U_a , анодным током i_a и током накала i_H (рис. 4.9). На начальном участке кривых увеличение анодного напряжения вызывает повышение анодного тока. Это объясняется тем, что по мере возрастания напряжения все большее число электронов из электронного облака, образованного раскаленной спиралью, приобретает скорость, достаточную для преодоления тормозящего поля пространственного заряда к катоду трубки.

При определенном для данного тока накала анодном напряжении все электроны, покинувшие катод, достигают анода, при этом наступает режим насыщения, при котором дальнейшее увеличение анодного напряжения не повышает анодный ток. На этом участке характеристики, называемом участком насыщения, анодный ток зависит

только от тока накала, т. е. от числа свободных электронов. Участок насыщения является рабочим участком рентгеновской трубки. В условиях эксплуатации энергию рентгеновского излучения регулируют изменением анодного напряжения, а интенсивность излучения – изменением тока накала.

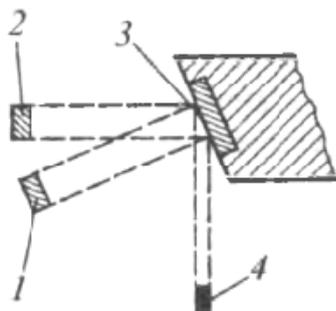


Рис. 4.8. Схема формирования оптического фокуса рентгеновской трубки: 1 – действительное фокусное пятно; 2 – сечение электронного пучка; 3 – анод; 4 – оптический фокус

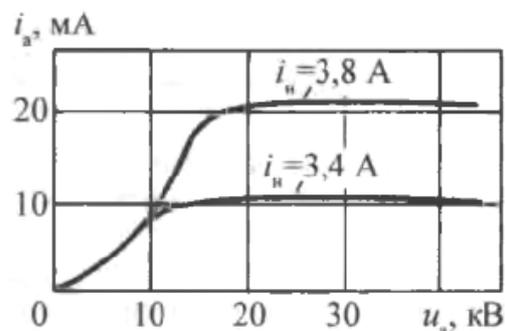


Рис. 4.9. Электрические характеристики рентгеновской трубки

В рентгенодефектоскопических аппаратах используют трубки, различные по конструкции и способам получения и формирования пучка излучения. Выбор рентгеновской трубки для конкретных условий контроля определяется его схемой, конструктивными особенностями просвечиваемого объекта, его материалом, толщиной и т. д.

Для просвечивания объектов со свободной полостью внутри, доступ к которым затруднен, предназначены также *рентгеновские трубки с вынесенным анодом*. Анод трубки представляет собой медную полу трубу, далеко выступающую за пределы стеклянной колбы. Вольфрамовая мишень находится внутри этой трубы, в конце ее консольной части. Снаружи на трубу надевают тонкостенную латунную оболочку, в промежутке между трубой и оболочкой циркулирует охлаждающая вода. Из-за большого расстояния между катодом и анодом в трубках подобной конструкции электрическая фокусировка электронного пучка оказывается недостаточной, поэтому прибегают к дополнительной магнитной фокусировке. Для этого на трубу анода надевают специальную фокусирующую катушку, через которую при прохождении электрического тока создается магнитное поле, суживающее электронный пучок. Степень фокусировки пучка регулируется изменением тока катушки.

Для просвечивания движущихся объектов и в случаях, когда нужно получить минимальный оптический фокус при большой мощности, применяют *трубки с вращающимся анодом*. В этих трубках вращается вольфрамовая мишень в форме усеченного конуса, на боковую поверхность которого направлен поток электронов, испускаемых катодом.

Подобное устройство позволяет повысить мощность этой трубки по сравнению с трубками с неподвижным анодом в десятки раз. В трубках с вращающимся анодом вал, на котором укреплена мишень, является ротором асинхронного двигателя. Статор двигателя расположен снаружи трубки. Поскольку охлаждение анода осуществляется только в результате вращения мишени, эти трубки эффективны при экспозиции до 5 с; дальнейшее увеличение времени экспозиции резко сокращает их мощность.

Трубка с вращающимся анодом и обычные двухэлектродные трубки могут быть выполнены двухфокусными. Катод двухфокусной трубки имеет две спирали: большую и малую, позволяющие получить два различных по величине линейных фокуса. Благодаря этому расширяется диапазон применения этой трубки.

Особый класс составляют импульсные рентгеновские трубки. Свободные электроны в них получают в результате автоэлектронной эмиссии при создании у катода трубки электрического поля напряженностью $> 10^8$ В/м. Импульсные трубки называют также трубками с «холодным» катодом (в отличие от трубок с «горячим» катодом, в которых для получения свободных электронов используют термоэлектронную эмиссию).

К недостаткам двухэлектродных импульсных трубок относят нестабильность интенсивности и спектрального состава излучения, обусловленных тем, что напряжение на аноде, при котором происходит пробой анодно-катодного пространства, сильно изменяется от включения к включению. В трехэлектродных импульсных трубках этот недостаток устраняют введением в трубку дополнительно поджигающего электрода. При приложении импульса пониженного напряжения (~ 10 кВ) между поджигающим электродом и катодом в строго заданный момент времени возникает дуговой разряд, который затем переходит в разряд между анодом и катодом.

Импульсные трубки имеют большую мгновенную мощность, а достигнутая частота повторения импульса меньше 50 Гц. Мощность дозы излучения на расстоянии 1 м меньше 2 Р/мин, тогда как трубки с горячим катодом при таких же напряжениях (250...300 кВ) дают

до 10 Р/мин. Ресурс работы импульсных рентгеновских трубок много меньше, чем трубок накала.

В настоящее время для промышленной рентгенодефектоскопии применяют в основном переносные рентгеновские аппараты с постоянной нагрузкой в следующем конструктивном исполнении:

- переносного (транспортабельного) блок-трансформатора (моноблок) с рентгеновской трубкой;
- переносного пульта управления чемоданного типа;
- комплекта соединительных низковольтных кабелей (и водопроводных шлангов для охлаждения блок-трансформатора).

Современную переносную (портативную) рентгеновскую аппаратуру разрабатывают и изготавливают единичными сериями с учетом возможности просвечивания материалов в широком диапазоне толщин. За базу построения такой серии аппаратов принимают анодное напряжение рентгеновской трубки. Большинство ведущих иностранных фирм принимает следующий базовый ряд наибольшего напряжения рентгеновской трубки, кВ: 10...80; 50...140; 50...200 (220); 80...300; 35...160; 60...250; 100...400.

В России выпускаются портативные рентгеновские аппараты серии «Шмель» с анодным напряжением 80...220 кВ для контроля изделий толщиной до 50 мм и др.

Импульсная рентгеновская аппаратура. К разряду переносной аппаратуры для промышленного просвечивания можно отнести и импульсную рентгеновскую аппаратуру с анодным напряжением до 0,5 МВ. Ее принцип действия основан на явлении возникновения кратковременной (0,1...0,2 мс) вспышки тормозного рентгеновского излучения при электрическом пробое вакуума в двухэлектродной рентгеновской трубке (с холодным катодом) под воздействием импульса анодного высокого напряжения (220...280 кВ), возникающего на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора при разряде накопительной емкости ($U_p = 7,5...10$ кВ) через первичную обмотку высоковольтного трансформатора.

Передвижная (разборная) рентгеновская аппаратура для промышленного просвечивания предназначена для работы в лабораторных условиях. Она позволяет оборудовать временные (передвижные) и стационарные рентгенодефектоскопические установки.

Радиоактивные источники гамма-излучения представляют собой ампулы, заполненные гамма-активным нуклидом (рис. 4.10).

Способ герметизации, материал и число ампул зависят от МЭД излучения физического состояния и свойств изотопов. Основными радиационно-дефектоскопическими характеристиками изотопов являются энергия излучения E , МЭД P , удельная активность источника, период полураспада $T_{1/2}$.

Источники можно разделить на следующие группы: высокоэнергетические (^{54}Mn , ^{60}Co и другие источники с $E_{\text{эф}} \gg 0,8$ МэВ), среднеэнергетические (Ir , Cs и др. с $0,3 < E_{\text{эф}} < 0,8$ МэВ), низкоэнергетические (^{170}Tm , ^{75}Se и др. с $E_{\text{эф}} < 0,3$ МэВ).

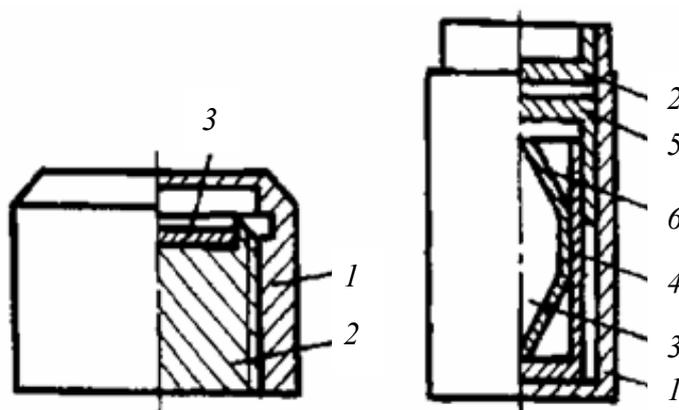


Рис. 4.10. Конструкция резьбового и сварного радиоактивных дефектоскопических источников: 1 – наружная ампула; 2, 5 – крышки; 3 – активная часть; 4 – внутренняя ампула; 6 – баллон

Основные их характеристики приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

**Основные характеристики радиоизотопных источников
 γ -излучения**

Источник	Гамма-эквивалент 1 Ки изотопа, γ -экв. Ra	МЭД γ -излучения 1 Ки на 1 м		Удельная активность	
		А/кг	Р/с	$\text{с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$	Ки/г
^{170}Tm	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-11}$	$2,79 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{12} \dots 3,7 \cdot 10^{13}$	350...1000
^{192}Ir	0,55	$3,3 \cdot 10^{-8}$	$1,29 \cdot 10^{-4}$	$(5,5 \dots 9,2) \cdot 10^{12}$	150...250
^{137}Cs	0,37	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$0,86 \cdot 10^{-4}$	$(3,7 \dots 9,2) \cdot 10^{11}$	10...25
^{60}Co	1,54	$9,2 \cdot 10^{-8}$	$3,57 \cdot 10^{-4}$	$(1,85 \dots 4,4) \cdot 10^{12}$	50...300

Окончание табл. 4.1

Источник	Гамма-эквивалент 1 Ки изотопа, γ -экв. Ra	Диапазоны энергии спектра		Период полураспада $T_{1/2}$
		Дж	МэВ	
^{170}Tm	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$\beta) 3,84 \cdot 10^{-13}, 1,52 \cdot 10^{-13}$ $\gamma) 1,34 \cdot 10^{-14}$	$\beta) 0,867, 0,950$ $\gamma) 0,084$	129 сут.
^{192}Ir	0,55	$\beta) 3,84 \cdot 10^{-14} \dots 1,07 \cdot 10^{-13}$ $\gamma) 3,20 \cdot 10^{-14} \dots 1,7 \cdot 10^{-13}$	$\beta) 0,24 \dots 0,67$ $\gamma) 0,2 \dots 1,06$	74,4 сут.
^{137}Cs	0,37	$\beta) 8,3 \cdot 10^{-14}$ $\gamma) 1,06 \cdot 10^{-13}$	$\beta) 0,52$ $\gamma) 0,661$	29,6 года
Источник	Гамма-эквивалент 1 Ки изотопа, γ -экв. Ra	Диапазоны энергии спектра		Период полураспада $T_{1/2}$
		Дж	МэВ	
^{60}Co	1,54	$\beta) 5,1 \cdot 10^{-14}$ $\gamma) 1,87 \cdot 10^{-13}, 2,13 \cdot 10^{-13}$	$\beta) 0,318$ $\gamma) 1,17, 1,33$	5,25 года

В промышленности наиболее широко применяют источники Yb, Tm, ^{75}Se , ^{192}Ir , ^{137}Cs и ^{60}Co , реже ^{145}Sm , ^{155}Eu , Am и другие в связи с их высокой стоимостью, сложностью получения исходного сырья и трудностью отделения сопутствующих примесей (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Основные характеристики
некоторых перспективных источников излучения**

Источник	Диапазоны энергии спектра E		Период полураспада $T_{1/2}$
	Дж	МэВ	
^{241}Am	$3,2 \cdot 10^{-16} \dots 1,1 \cdot 10^{-15}$	0,02...0,07	470 лет
^{145}Sm	$9,7 \cdot 10^{-16}$	0,061	340 сут.
^{155}Eu	$9,7 \cdot 10^{-16} \dots 2,1 \cdot 10^{-15}$	0,061...0,132	1,81 года
^{153}Gd	$1,1 \cdot 10^{-15} \dots 1,64 \cdot 10^{-14}$	0,07...0,103	242 сут.
^{169}Yb	$1,0 \cdot 10^{-16} \dots 4,94 \cdot 10^{-14}$	0,063...0,309	31,8 сут.
^{75}Se	$1,06 \cdot 10^{-16} \dots 9,2 \cdot 10^{-14}$	0,066...0,572	120,4 сут.
^{54}Mn	$1,28 \cdot 10^{-13}$	0,8	291 сут.
^{152}Eu	$(1,95 \dots 2,25) 10^{-15}$	0,122...1,405	12,7 года

Радиоактивные источники быстрых нейтронов. Ядра некоторых радионуклидов при распаде испускают альфа-частицы или гамма-кванты с энергией, превышающей порог реакций (α, n) и (γ, n) на некоторых легких элементах. На основе таких нуклидов можно создавать достаточно простые и компактные источники нейтронов. Энергия альфа-частиц, испускаемых альфа-радиоактивными нуклидами (^{210}Po , ^{227}Ac , ^2Cf), обычно равна 5...6 МэВ.

Под воздействием таких частиц реакция (α, n) с относительно большой вероятностью осуществима лишь на ядрах некоторых легких элементов (бериллий, бор, фтор, литий), которые в основном и используются в качестве мишеней в рассматриваемых источниках. В зависимости от энергии альфа-частиц максимальная энергия нейтронов, возникающих в реакции (α, n) на бериллии, боре и фторе, не превышает, соответственно, 10...12, ~6 и ~3 МэВ, а средняя энергия нейтронов для этих источников, соответственно, равна 3,5...4,5; 2,5...3 и 1...1,5 МэВ.

Сравнивая энергию гамма-излучения радионуклидов с энергией связи нейтронов в различных атомных ядрах, видим, что при создании фотонейтронных источников в качестве источников гамма-излучения можно использовать ограниченное число радионуклидов, только таких, как бериллий и дейтерий, у которых энергия связи нейтронов в ядрах равна, соответственно, 1,6665 и 2,226 МэВ. Реакцию (γ, n) могут вызвать лишь гамма-кванты, энергия которых превышает указанную энергию связи нейтрона.

Конструктивно фотонейтронные источники обычно представляют собой блок из бериллия или тяжелой воды с линейными размерами в несколько сантиметров, внутри которого в герметичной ампуле размещается источник гамма-излучения.

Из различных фотонейтронных источников наиболее широко применяют ($^{124}\text{Sb} + \text{Be}$)-источник, что объясняется относительно большим периодом полураспада ^{124}Sb (60 сут) и возможностью получения высокой удельной активности сурьмы.

Существенным недостатком всех активных фотонейтронных источников являются малые периоды полураспада пригодных радионуклидов, сложность получения требуемых активностей и высокий фон гамма-излучения.

Среди радиоактивных источников нейтронов особое место занимают источники ^{238}Pu , ^{242}Cm , ^{244}Cm , ^{252}Cf , основанные на спонтанном (самопроизвольном) делении ядер (табл. 4.3).

Наиболее предпочтителен для изготовления ^{252}Cf .

Таблица 4.3

Основные характеристики радиоизотопных источников быстрых нейтронов

Источник	Период полураспада $T_{1/2}$	Выход нейтронов на 1 г изотопа, с^{-1}	Средняя энергия нейтронов	
			Дж	МэВ
^{252}Cf	2,63 года	$3 \cdot 10^{12}$	$3,7 \cdot 10^{-13}$	2,3
$^{210}\text{Po} + \text{Be}$	138 сут.	$1,28 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{-13}$	4,3
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	60 сут.	$2,7 \cdot 10^9$	$3,85 \cdot 10^{-15}$	0,024
Источник	МЭД γ -излучения на 1 м		Энергия γ -излучения	
	А/кг	Р/с	Дж	МэВ
^{252}Cf	$2,05 \cdot 10^{-8}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-15} \dots 6 \cdot 10^{-16}$	0,04...0,1
$^{210}\text{Po} + \text{Be}$	$1,4 \cdot 10^{-8}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,28 \cdot 10^{-13}$	0,8
$^{124}\text{Sb} + \text{Be}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	12,5	$2,7 \cdot 10^{-13}$	1,7

Гамма-дефектоскопы используют в основном в полевых и монтажных условиях при отсутствии источников электропитания изделий, расположенных в труднодоступных местах. В общем случае гамма-дефектоскоп состоит из источника излучения (изотопа), заключенного в герметичную металлическую ампулу, которая помещается в защитную радиационную головку (контейнер), и пульта управления, обеспечивающего выпуск и перекрытие пучка излучения.

В комплект гамма-дефектоскопа входят также вспомогательное оборудование и принадлежности (транспортные тележки, штативы для крепления радиационной головки, контейнеры для безопасного транспортирования и перезарядки источников излучения и др.). Выпускают гамма-дефектоскопы двух видов: универсальные шлангового типа, у которых источник излучения подается к месту контроля по шлангу-ампулопроводу, и для фронтального и панорамного просвечивания (ампула не выходит за пределы радиационной головки).

Шланговые гамма-дефектоскопы (рис. 4.11) нашли наиболее широкое применение в промышленности в связи с тем, что они обеспечивают подачу источника излучения из радиационной головки 2 по шлангу-ампулопроводу 3 в коллимирующую головку на расстоянии 5...12 м.

В этих аппаратах источник излучения подается по ампулопроводу с помощью гибкого троса, находящегося в зацеплении с зубчатым приводным колесом.

Гамма-дефектоскопы снабжены набором источников, гамма-излучения с различными размерами активной части и МЭД гамма-излучения. Набор источников размещается в магазине-контейнере, что позволяет просвечивать изделия различной толщины на разных фокусных расстояниях.

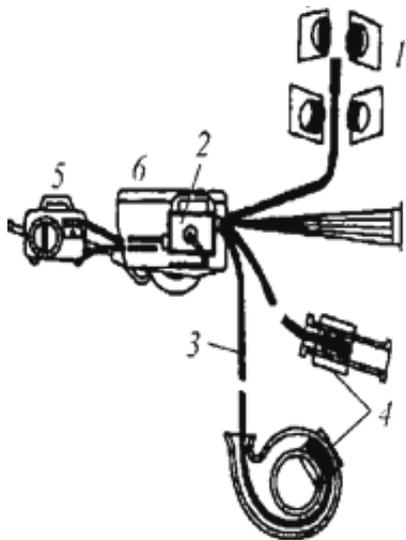


Рис. 4.11. Схема универсального шлангового гамма-дефектоскопа:

1 – коллимирующая головка; 2 – радиационная головка; 3 – ампулопровод; 4 – пленка; 5 – привод; 6 – тележка

Гамма-дефектоскопы для фронтального и панорамного просвечивания предназначены для использования в полевых, монтажных и стапельных условиях в тех случаях, когда применение шланговых аппаратов невозможно из-за ограниченных размеров радиационно-защитных зон. Пример такого дефектоскопа показан на рис. 4.12.

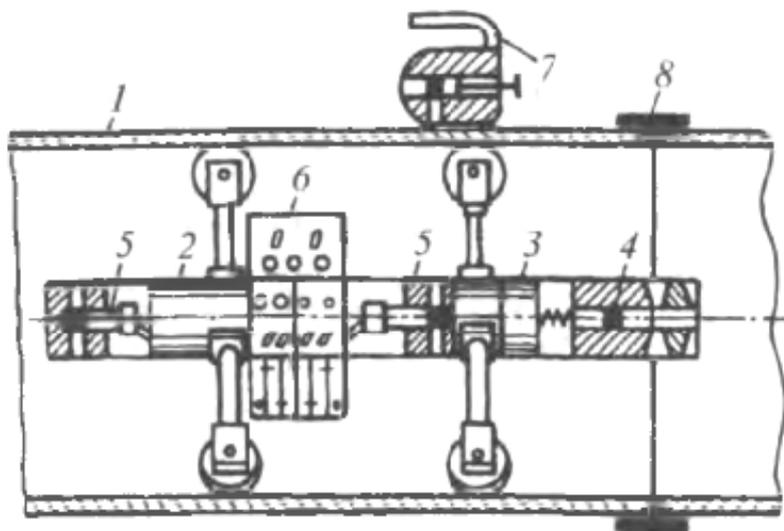


Рис. 4.12. Гамма-дефектоскоп для контроля трубопроводов внутри трубы:

1 – труба; 2 – привод тележки; 3 – привод источника; 4 – радиационная головка; 5 – датчик с коллиматором; 6 – блок автоматики; 7 – реперный контейнер; 8 – пленка

Всю информацию о наличии или отсутствии дефектов при радиометрическом НК получают с помощью фотографических детекторов, к которым относят радиографические пленки, применяемые в радиографии и дозиметрии.

Основой *радиографической пленки* служит гибкая прозрачная подложка 4 толщиной 100...200 мкм из негорючей пластмассы – ацетатцеллюлозы (рис. 4.13).

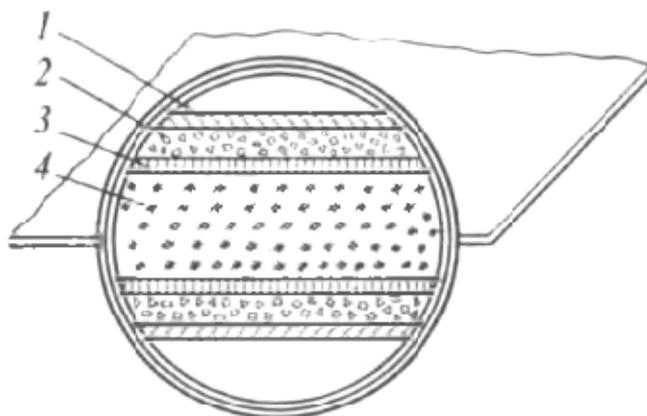


Рис. 4.13. Схема строения радиографической пленки

На подложку с двух сторон наносят чувствительную к излучению эмульсию 2, представляющую собой слой желатина толщиной 10...30 мкм, в котором равномерно распределены микрокристаллы бромистого серебра. Размеры микрокристаллов меньше 3 мкм. Для увеличения прочности соединения между эмульсией и подложкой лежит слой специального клея 3, называемый подслоем. Снаружи на эмульсию наносят слой 1 из задубленной желатины толщиной до 1 мкм, предохраняющий эмульсию от механических повреждений.

Ионизирующие излучения в кристаллах бромистого серебра вызывают фотохимические превращения: $Ag + Br + + (h\nu) - Ag^+ + Br + + e - Ag + Br$, т. е. под влиянием кванта излучения $h\nu$ отрицательный ион брома Br^- теряет свой валентный электрон и становится нейтральным атомом Br . Этот атом перемещается к поверхности кристалла, где связывается желатиной, а освободившийся электрон, взаимодействуя со свободным положительным ионом серебра, превращает его в нейтральный атом серебра Ag .

Когда в результате действия излучения в кристалле бромистого серебра накапливается определенное число атомов восстановленного металлического серебра, в нем образуется так называемый центр скрытого изображения. Для превращения скрытого изображения в видимое радиографическую пленку обрабатывают в растворе

проявителя. В последнем происходит химическая реакция восстановления бромистого серебра в металлическое, причем процесс восстановления идет избирательно: наиболее эффективно он протекает в кристаллах, имеющих центры скрытого изображения. Эти центры, называемые также центрами проявления, можно рассматривать как частицы катализатора, способствующие восстановлению ионов серебра во всем объеме облученных кристаллов.

Зерна восстановленного металлического серебра придают пленке темную окраску, т. е. определяют ее прозрачность. В общем случае проявленное изображение представляет собой картину из почерневших и прозрачных (светлых) мест на пленке, отвечающих, соответственно, участкам эмульсии, подвергнутым и не подвергнутым действию излучения. Степень почернения какого-либо участка изображения зависит от числа зерен металлического серебра на нем и определяется интенсивностью излучения I и временем t его воздействия на эмульсию. Произведение It называют *экспозицией*.

Радиографические пленки подразделяют на два класса: 1) безэкранные пленки, предназначенные для использования без флуоресцентных экранов, или с металлическими усиливающими экранами; 2) экранные пленки, предназначены для использования с флуоресцентными усиливающими экранами в связи с их высокой чувствительностью к видимой и ультрафиолетовой частям спектра. Мелкозернистые пленки типа РТ-5, РТ-4М отличаются более высокой разрешающей способностью, в отличие от крупнозернистых пленок типа РТ-3, РТ-1 и РТ-2.

Усиливающие металлические и флуоресцентные экраны применяют для сокращения времени просвечивания. Усиливающее действие металлических экранов основано на освобождении из них вторичных электронов благодаря ионизирующему излучению. Освобожденные вторичные электроны попадают на эмульсию пленки и вызывают дополнительную фотохимическую реакцию, усиливающую действие первичного излучения.

Для каждого источника ионизирующего излучения материал экрана следует выбирать в зависимости от энергии излучения, в частности, для рентгеновского излучения целесообразно использовать медь, титан, олово, свинец, вольфрам; для гамма-излучения – вольфрам, свинец, медь.

Практика показывает, что наибольшую эффективность обеспечивают металлические экраны из медной и титановой фольги. В этом случае достигается гораздо лучшая контрастность снимков. Толщина фольги должна быть равна максимальной длине пробега вторичных

электронов в экране. Обычно толщина экрана (фольги) составляет 0,05...0,5 мм. В качестве люминофоров используют ZnS, CdS, BaSO₄, PbSO₄, CaWO₄ и др.

Флуоресцентные экраны изготавливают в виде пластмассовых или картонных подложек, на которые наносят слой люминофора. Эти экраны рекомендуется применять с экранными радиографическими пленками, поскольку спектральная чувствительность эмульсии пленки и спектр свечения экранов хорошо согласуются. При использовании флуоресцентных экранов разрешающая способность изображения на пленках существенно ухудшается из-за крупнозернистости экранов.

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

Эталоны чувствительности. Для определения относительной чувствительности радиографического контроля используют специальные эталоны.

Эталон представляет собой пластину с идеальными дефектами, контуры которых резко очерчены. На границе дефектов эталона происходит резкое изменение суммарной толщины просвечиваемого материала, в то время как в реальном металле – постепенное изменение его толщины на границе дефект – бездефектная зона. Кроме того, реальные дефекты часто рассредоточены и имеют неправильные очертания.

Вследствие этого поры или шлаковые включения, диаметры которых равны, соответственно, высоте прорези или диаметру проволоки эталона, могут быть не выявлены, несмотря на то, что изображения искусственных дефектов четко видны.

В практике радиационной дефектоскопии применяют несколько типов эталонов чувствительности. Наиболее часто используют канавочные и провололочные эталоны четырех типоразмеров каждый. На канавочном эталоне имеется шесть канавок, глубина рядом расположенных канавок различается в 1,39 раза. Провололочный эталон представляет собой пластиковый чехол с семью проволоками различного диаметра, рядом расположенные проволоки различаются размерами в 1,25 раза. Материал эталона должен быть аналогичен материалу контролируемого изделия. Эталоны маркируют свинцовыми буквами и цифрами. Буквы обозначают материал эталона, цифры – его номер, например, Cu2, Fe1, Al3, Ti4. Оба вида эталона равнозначны по чувствительности, выбор их определяется условиями работы.

Перед радиографическим контролем пленку вместе с усиливающими экранами помещают в специальную светозащитную кассету.

В практике промышленной радиографии применяют гибкие и реже – жесткие кассеты.

Преимущественное использование гибких кассет обусловлено тем, что они обеспечивают плотное прилегание к контролируемой поверхности сложной конфигурации.

Недостатком гибких кассет является отсутствие полной гарантии плотности прижатия пленки к усиливающим экранам. Этому недостатка лишены жесткие кассеты, выполненные из алюминиевых сплавов и пластмасс, но их можно применять только при контроле изделий простой формы, когда не требуется изгибать пленку.

Наиболее качественное прилегание усиливающих экранов к радиографической пленке обеспечивают вакуумные кассеты. Они имеют герметичный корпус. Эти кассеты применяют крайне редко из-за их дороговизны и сложности использования.

Кроме традиционных методов радиационного НК в последнее время появились и применяются ряд новых: ксерорадиография, флюорография, цветная радиография, нейтронная радиография, протонная радиография и др.

Ксерорадиографический метод контроля представляет собой процесс получения изображения на поверхности пластины, электрические свойства которой изменяются в соответствии с энергией принятого рентгеновского или гамма-излучения. Если зарядить такую пластину электрическим зарядом до определенного уровня, а затем подвергнуть ионизационному облучению, то величина остаточного заряда на любом участке пластины будет однозначно связана с интенсивностью излучения, падающего на данный участок. При этом остаточный заряд будет тем меньше, чем больше интенсивность излучения.

Следовательно, в тех местах пластины, на которые попало излучение, прошедшее через какой-либо дефект (непровар, пора, раковина), остаточный заряд будет меньше, чем в других местах пластины.

В настоящее время чувствительность ксерографического метода несколько ниже радиографического на рентгеновскую пленку, но несомненные преимущества ксерографического метода заключается в оперативности получения снимка и сухом методе проявления. Методом фотосъемки с одной ксерограммы можно сделать высококачественные фотографии с большим числом копий.

При ксерографии отпадает необходимость в дефицитных материалах и процессах фотообработки. Стоимость контроля по сравнению с радиографическим снижается в 6...7 раз.

Флюорографический метод НК заключается в регистрации рентгеновского или гамма-излучения на фотобумагу или фотопленку,

которые содержат в 7...9 раз меньше серебра, чем рентгеновская пленка. Необходимым условием является обязательное сочетание фотобумаги или фотопленки и усиливающих флуоресцентных экранов. Ионизирующее излучение падает вначале на экран с флуоресцентным слоем для формирования оптического изображения, которое фиксируется на фотобумаге, контактирующей с флуоресцентным экраном.

В зависимости от энергии ионизирующего излучения применяют определенную комбинацию фоторегистратора и усиливающего экрана, при которой достигается наилучшая чувствительность. Требуется, чтобы основные характеристики (разрешающая способность, максимум спектра поглощения и высвечивания и др.) с фоторегистратора и экранов были достаточно близкими по значениям.

Обычный черно-белый рентгеновский снимок содержит только один оценочный параметр: яркость серого оттенка. Цветная радиография, в отличие от черно-белой, позволяет получить два добавочных параметра: цвет и насыщенность. Благодаря этому увеличивается информативная способность радиографического снимка. Для получения цветного изображения с помощью черно-белой фотопленки делают два или три снимка контролируемого объекта рентгеновским излучением различной энергии и интенсивности (к о с в е н н ы й м е т о д). При этом экспонируют поочередно каждую пленку или все одновременно с использованием фильтров для селекции рентгеновского излучения. В результате изменения его эффективной энергии изображения на каждой пленке отличаются друг от друга. Затем черно-белые негативы окрашивают, например, первый снимок в красный цвет, второй в зеленый, третий в синий и составляют вместе. Расшифровку полученного цветного изображения проводят на негатоскопе. Оператор воспринимает больше оттенков цвета, чем градаций яркости, что облегчает контроль качества и повышает его достоверность благодаря учету одновременно большего объема информации.

Другим способом цветной радиографии является использование цветной фотопленки (прямой метод). Этот метод основан на различных чувствительности и контрастности эмульсионных слоев многослойных фотографических или рентгенографических цветных пленок при воздействии на них ионизирующего излучения.

Если пленку просвечивать рентгеновским или гамма-излучением, то она окажется разбалансированной как по контрасту, так и по чувствительности. После проявления на ней возникают различные цветовые оттенки, обусловленные интенсивностью падающего света.

При цветной радиографии улучшаются выявляемость дефектов и возможность контроля изделий с большими перепадами толщин, а также определение размеров дефектов в направлении просвечивания.

Нейтронная радиография основана на облучении объекта контролем коллимированным пучком нейтронов и регистрации теневого изображения объекта на рентгеновской пленке или другом детекторе.

Физической основой нейтронной радиографии является зависимость излучения от химического состава вещества и прежде всего от его атомного номера и массового числа. В отличие от рентгеновского и гамма-излучений, эта зависимость для нейтронов выражена более сильно. Принципиально важное значение нейтронной радиографии состоит в возможности отдельного контроля химических компонентов материала.

Например, с использованием обычных методов контроля нельзя даже обнаружить наличие легких или органических материалов на стали при близких толщинах, а нейтронная радиография позволяет контролировать детали размером ~ 1 мм из органических материалов сквозь слои металлов толщиной в сантиметры. Это позволяет применять нейтронную радиографию при контроле композиционных материалов.

Чувствительность к выявлению дефектов методом нейтронной радиографии при толщине стального изделия 10...80 мм составляет 0,5...2 %.

Протонная радиография основана на использовании потока протонов (альфа-частиц) для НК и базируется на особенностях распространения и взаимодействия их с веществом. Источниками протонов служат те же аппараты, что и при рентгено- и гамма-графировании. Главной особенностью применения протонной радиографии является контроль тонких изделий или их частей (типа листа, фольги и т. п.), поскольку протоны поглощаются сравнительно тонкими слоями. В отдельных случаях протонная радиография обеспечивает значительно более высокую чувствительность ($\sim 0,1$ %) по сравнению с рентгенографией.

Кроме перечисленных, в настоящее время широко применяются методы радиоскопии, радиометрии и томографии.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие средства применяют для защиты от ионизирующих излучений?
2. Какие материалы можно использовать для создания средств защиты?
3. Что называют поглощенной дозой излучения?
4. Дайте определение понятию «эквивалентная доза излучения»?
5. В каких единицах измеряют величину доз излучений?

5. МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Методы магнитной дефектоскопии основаны на регистрации и измерении магнитных полей и их неоднородностей. Магнитное поле существует вблизи проводника с током и постоянных магнитов. Причина его возникновения – упорядоченное движение зарядов в проводнике или электронов в атомах вещества магнита.

Основной характеристикой магнитного поля является вектор *магнитной индукции* **V**. Вектор **V** направлен по касательной к магнитным силовым линиям, поэтому по их виду можно судить о направлении вектора индукции.

Вектор **V** имеет смысл плотности магнитного потока Φ . Для наглядности представления магнитного поля линии магнитной индукции условно проводят так, чтобы их число, приходящееся на единицу площади, перпендикулярной к ним поверхности, было пропорционально магнитной индукции **V**.

Поэтому магнитный поток Φ через какую-либо поверхность пропорционален общему числу силовых линий, пронизывающих ее. В однородном магнитном поле магнитный поток Φ через площадку S , расположенную перпендикулярно к магнитным линиям, равен произведению магнитной индукции **V** на площадку. Магнитный поток выражается в веберах, а магнитная индукция – в теслах:

$$\Phi = \mathbf{B}S. \quad (5.1)$$

Другой важной характеристикой магнитного поля является вектор напряженности, он определяет поле, создаваемое внешним по отношению к данному телу источником. На практике эти поля чаще всего создаются различными намагничивающими катушками или постоянными магнитами.

Все вещества в той или иной степени обладают магнитными свойствами. Магнитные свойства вещества характеризуются магнитной проницаемостью μ . В зависимости от ее значения все материалы подразделяют на три группы:

- диамагнитные, у которых μ на несколько миллионов или тысячных долей меньше 1 (медь, цинк, серебро и др.);
- парамагнитные с μ на несколько миллионов или тысячных долей больше 1 (марганец, платина, алюминий);
- ферромагнитные, у которых μ достигает десятков тысяч. К таким материалам относят только четыре элемента (железо, никель, кобальт, гадолиний) и некоторые сплавы металлов.

Ферромагнитные свойства металлов обусловлены внутренними молекулярными токами – в основном вращением электронов вокруг собственной оси. В пределах малых объемов (10...10 см) элементарных областей, так называемых доменов, магнитные поля молекулярных токов образуют результирующее поле домена (рис. 5.1).

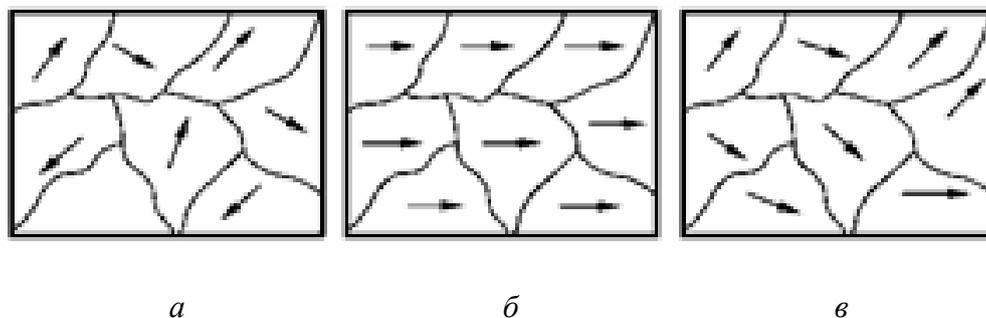


Рис. 5.1. Ориентация доменов в ферромагнитном материале:
а – деталь размагничена; *б* – деталь намагничена до индукции насыщения; *в* – деталь намагничена до остаточной намагниченности

Магнитные поля доменов при отсутствии внешнего магнитного поля направлены произвольно и компенсируют друг друга. Суммарное поле доменов в этом случае равно нулю, деталь оказывается размагниченной (рис. 5.1, *а*). Если на деталь действует внешнее поле, то под его влиянием поля отдельных доменов устанавливаются по направлению внешнего поля с однородным изменением границ между доменами. В результате образуется общее магнитное поле доменов, деталь оказывается намагниченной (рис. 5.1, *б*). При намагничивании магнитное поле доменов накладывается на внешнее магнитное поле в контролируемой детали.

Искажение магнитного поля, происходящее при внесении в него диамагнитных и парамагнитных тел, незначительно. Напротив, магнитное поле искажается весьма существенно, если в него будут помещены ферромагнитные тела.

Железный образец, обладающий проницаемостью в сотни и тысячи раз больше магнитной проницаемости в вакууме, вбирает в себя магнитное поле. Это явление характеризуется намагниченностью M , которая определяет состояние вещества при его намагничивании (воздействии на него магнитного поля H).

Магнитная восприимчивость – это безразмерная величина χ_m , характеризующая способность вещества (магнетика) намагничиваться в магнитном поле. У диамагнетиков она меньше 0, у парамагнетиков больше 0, у ферромагнетиков много больше 0 (10^4 и более).

Принципиальное отличие ферромагнетиков от других веществ заключается в отсутствии линейной зависимости магнитного состояния вещества от напряженности магнитного поля (рис. 5.2).

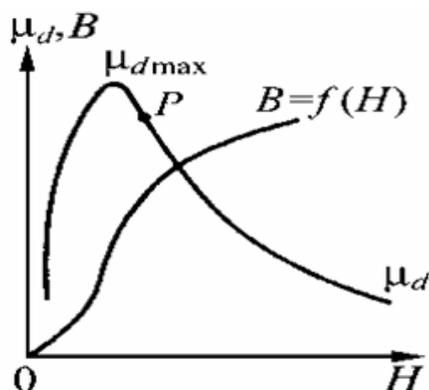


Рис. 5.2. Зависимость B и μ_d от H для ферромагнитного материала

Сначала индукция [кривая $B = f(H)$] растет медленно, затем быстро и, наконец, наступает магнитное насыщение. Кривую $B = f(H)$ называют кривой первоначального намагничивания, а кривую $\mu_d = f(H)$ кривой магнитной проницаемости. Она показывает зависимость относительной дифференциальной проницаемости от напряженности магнитного поля H , является весьма важной характеристикой материала, если говорить о дефектоскопии.

Полная проницаемость μ ферромагнетика определяется отношением величины индукции B к соответствующему значению магнитного поля H в данной точке кривой индукции:

$$\mu = B / H. \quad (5.1)$$

К наилучшим условиям выявления дефектов относятся такие, при которых магнитная проницаемость мала, а индукция велика. Подобное магнитное состояние может быть достигнуто в магнитных полях, превышающих поле $H_{\text{цmax}}$, т. е. на участке кривой $\mu = f(H)$, где проницаемость убывает. Если начальное намагничивание металла таково, что точка P оказывается слева от точки $\mu_{d\text{max}}$ на кривой магнитной проницаемости, то уменьшение поперечного сечения за счет дефекта вызовет увеличение магнитной индукции, а также может привести к более высокой магнитной проницаемости, и дефект может быть не обнаружен. Это условие необходимо учитывать при выборе режимов намагничивания объекта контроля.

Характерная особенность ферромагнетиков состоит также в явлении *эффекта гистерезиса* (рис. 5.3).

Магнитные свойства железа и его сплавов могут меняться в широких пределах в зависимости от структуры, фазового состава,

величины зерна металла, пластической деформации и т. д. Различают ферромагнитную (феррит) и парамагнитную (аустенит) фазы железа.

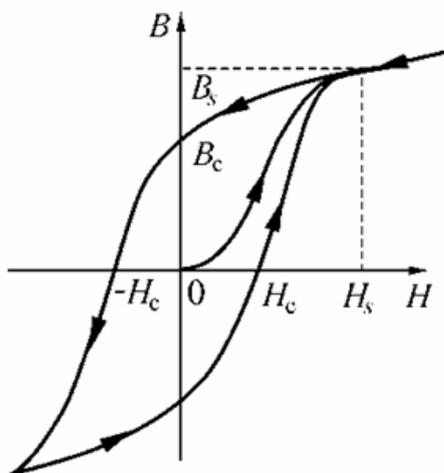


Рис. 5.3. Петля гистерезиса при перемагничивании образца

Безуглеродистые сплавы железа, а также аустенитные стали обычно парамагнитные; они содержат лишь небольшое количество феррита (α -фаза), поэтому для их намагничивания требуются большие намагничивающие поля (до 1 000 000 А/м). Для обычных конструкционных низко- и среднелегированных сталей, у которых преобладает ферромагнитная фаза (феррит, мартенсит), а количество аустенита меньше 10...15 %, магнитное насыщение достигается при полях до $H = 100\ 000$ А/м. Определяя изменение магнитных характеристик сталей, можно установить количественное соотношение их фаз, содержание аустенита, феррита, а также исследовать состояние сталей после термообработки, сварки, прокатки и т. д.

При внесении ферромагнетика в переменное магнитное поле в нем возникают вихревые токи, создающие свое собственное электромагнитное поле. Вихревые токи по правилам Ленца стремятся противодействовать изменению внешнего магнитного поля, что, в отличие от постоянного магнитного поля, приводит к неравномерному распределению индукции и напряженности магнитного поля, а также электрического поля по сечению образца.

Плотность вихревых токов максимальна на поверхности изделия, а амплитуды B и H убывают в глубь изделия по экспоненциальному закону.

По мере увеличения частоты электрической проводимости и магнитной проницаемости уменьшается глубина проникновения электромагнитного поля. Фактически высокочастотные электромагнитные поля распространяются в тонком поверхностном слое, а в глубине ферромагнетика они пренебрежимо малы. Это явление носит название *скин-эффекта*.

Вследствие этого эффекта при намагничивании переменным магнитным полем не удается обнаружить подповерхностные дефекты (на глубине 2...4 мм), которые уверенно выявляются при работе в постоянном магнитном поле. Переменное магнитное поле обычно создают с помощью катушек (соленоидов), питаемых переменным током.

Магнитные методы контроля ферромагнитных металлов основаны на обнаружении локальных возмущений поля, создаваемых дефектами в намагниченном изделии. Магнитный поток, распространяясь по изделию и встречая на своем пути поверхностный дефект, огибает его вследствие того, что магнитная проницаемость дефекта значительно ниже (в 1000 раз) магнитной проницаемости основного металла. Это можно объяснить следующим образом. Часть магнитно-силовых линий как бы обрывается на одной грани дефекта и снова начинается на другой. Конец линии можно рассматривать как некоторый положительный магнитный заряд, а начало как отрицательный магнитный заряд. Каждый магнитный заряд создает магнитное поле, направленное из него как из центра.

Суммарное поле магнитных зарядов H_d называют *полем дефекта*. Поле H_d имеет сосредоточенный характер, поэтому результирующее поле, которое складывается из внешнего намагничивающего поля H_0 и поля дефекта H_d , становится неоднородным и имеет сложную картину.

Чем значительнее размеры дефекта и ближе к нему точка наблюдения и чем заметнее различие проницаемостей, тем больше амплитудные значения составляющих полей дефектов.

Следует отметить, что магнитное поле рассеяния возникает не только над дефектами, но и над любыми локальными изменениями однородности магнитных свойств. Интенсивность поля рассеяния в этом случае зависит от соотношения проницаемостей.

В переменном магнитном поле дефекты сплошности среды также вызывают локальное изменение вектора напряженности магнитного поля H , аналогичное в первом приближении рассмотренному выше для постоянного магнитного поля, однако из-за скин-эффекта информация может быть получена только о дефектах, залегающих сравнительно неглубоко (как правило, на глубине меньше 1 мм).

В зависимости от способа индикации магнитных полей различают методы с непосредственным преобразованием магнитного поля в электрический сигнал и методы без преобразования в электрический сигнал.

Для регистрации и измерения магнитных полей и их неоднородностей в промышленной дефектоскопии чаще всего применяют плоские катушки поля, феррозонды, индукционные головки, магнитные ленты и магнитные порошки.

С помощью катушек проще всего измеряют переменное магнитное поле. Для измерения постоянных и переменных однородных и неоднородных полей применяют феррозонды. Наиболее распространены дифференциальные феррозонды с продольным возбуждением. Для регистрации постоянного магнитного поля без преобразования в электрический сигнал широко используется тонкая ферромагнитная лента (рис. 5.4).

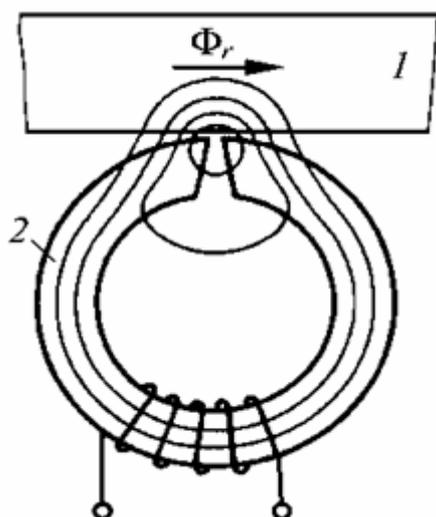


Рис. 5.4. Разветвление локального магнитного потока Φ_r :
1 – магнитная лента; 2 – магнитная головка

Феррозондовые преобразователи представляют собой два пермалловых сердечника с первичными обмотками возбуждения и вторичными измерительными обмотками на каждом. Они предназначены для измерения напряженности магнитного поля. Их действие основано на нелинейности кривых намагничивания сердечников из магнитных материалов. При создании в первичной обмотке поля возбуждения $H(t)$ в сердечнике возникает индукция $B(t)$, которая индуцирует ЭДС. Преобразователи Холла работают по принципу возникновения разности потенциалов в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под действием сил Лоренца. Промышленность выпускает кремниевые, германиевые и арсенидгаллиевые преобразователи.

Преобразователи Холла работают по принципу возникновения разности потенциалов в результате искривления пути носителей тока в металлах и полупроводниках, находящихся в магнитном поле под

действием сил Лоренца. Промышленность выпускает кремниевые, германиевые и арсенидгаллиевые преобразователи.

Другим способом индикации неоднородностей магнитного поля является метод с использованием магнитного порошка, заключающийся в эффекте взаимодействия неоднородного магнитного поля с ферромагнитными частицами. Этот метод, несмотря на отсутствие преобразования в электрический сигнал, обладает большой наглядностью и очень высокой чувствительностью.

Магнитопорошковая дефектоскопия (МПД) в системе методов НК занимает одно из ведущих мест. Это связано с ее высокой чувствительностью к поверхностным и подповерхностным дефектам, простотой, универсальностью и наглядностью представления результатов контроля. Магнитопорошковый метод применяют для контроля изделий, деталей, сварных соединений конструкций из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью больше 40 с целью выявления невидимых невооруженным глазом поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности типа трещин, непроваров.

Магнитопорошковый метод основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами в детали при ее намагничивании, с помощью ферромагнитных частиц (магнитного порошка), которые находятся во взвешенном состоянии в дисперсионной среде или воздухе.

Чувствительность магнитопорошкового метода зависит от ряда факторов:

- размера частиц порошка и способа его нанесения;
- напряженности приложенного намагничивающего поля;
- рода приложенного тока (переменный или постоянный);
- формы, размера и глубины залегания дефектов;
- от их ориентации относительно поверхности изделия и направления намагничивания;
- состояния и формы поверхности;
- способа намагничивания.

Частицы порошка должны иметь размер 5...10 мкм. Для выявления глубоко залегающих дефектов применяют более крупный магнитный порошок. Методика магнитопорошкового способа включает в себя следующие операции (ГОСТ 21105–87):

- подготовку поверхностей перед контролем и очистку их от загрязнений, окалины, следов шлака после сварки;

- подготовку суспензии, заключающуюся в интенсивном перемешивании магнитного порошка с транспортирующей жидкостью;
- намагничивание контролируемого изделия;
- нанесение суспензии или порошка на поверхность контролируемого изделия;
- осмотр поверхности изделия и выявление мест, покрытых отложениями порошка;
- размагничивание.

Поверхности изделий, сварных соединений и околошовных зон основного металла шириной, равной ширине шва, но меньше 20 мм с обеих сторон, очищают от грязи, масла, шлаков, окалины и других покрытий, мешающих контролю. Не допускаются резкие неровности поверхности, наплывы, натеки, незаполненные кратеры и другие дефекты. Видимые дефекты необходимо устранить до проведения контроля. Шероховатость контролируемой поверхности должна быть не грубее $Ra\ 10,0$.

Достаточно широко в промышленности применяется магнитно-графический метод. Сущность этого метода заключается в намагничивании контролируемого участка сварного шва и околошовной зоны с одновременной записью магнитного поля на магнитную ленту и последующем считывании полученной информации с нее специальными воспроизводящими устройствами магнитографических дефектоскопов, оснащенных вторичными преобразователями в виде феррозондов или индукционных головок. Этот сигнал затем поступает на экран электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

Технология магнитографического контроля включает в себя ряд операций (ГОСТ 25225–82):

1. Осмотр и подготовка поверхности контролируемого изделия. При этом с поверхности контролируемых швов должны быть удалены остатки шлака, брызги расплавленного металла, грязь и т. д.

2. Наложение на шов отрезка магнитной ленты. Перед началом работы магнитную ленту подвергают размагничиванию. Прижимают ленту к шву плоских изделий специальной эластичной «подушкой».

При контроле кольцевых швов труб, сосудов и других изделий магнитную ленту к поверхности шва прижимают по всему периметру эластичным резиновым поясом.

3. Намагничивание контролируемого изделия при оптимальных режимах в зависимости от типа намагничивающего устройства, толщины сварного шва и его магнитных свойств.

4. Расшифровка результатов контроля, для чего магнитную ленту устанавливают в считывающее устройство дефектоскопа, и по сигналам на его экранах выявляют дефекты. Перед воспроизведением

сигналов дефектоскоп настраивают по эталонной магнитограмме с записью магнитного поля дефекта минимально допустимых размеров. Во время воспроизведения регистрируются все дефекты, амплитуда импульса от которых на экране осциллографа превышает амплитуду импульса от эталонного дефекта.

Магнитографический метод в основном применяют для контроля стыковых швов, выполненных сваркой плавлением, и в первую очередь при дефектоскопии швов магистральных трубопроводов. Этим методом можно контролировать сварные изделия и конструкции толщиной до 20...25 мм.

Установлено, что этим методом уверенно обнаруживаются внутренние плоскостные дефекты, когда их вертикальный размер составляет 8...10 % от толщины сварного шва. При снятой выпуклости шва максимальная чувствительность контроля к указанным дефектам достигает 5 %. Округлые внутренние дефекты обнаруживаются, когда их размер по высоте больше 20 % толщины изделия.

Чувствительность магнитографического метода к поверхностным дефектам примерно такая же или несколько хуже, чем у магнитопорошкового. Чем глубже расположен дефект от поверхности изделия, на которую укладывается магнитная лента, тем хуже он выявляется. Современная аппаратура позволяет находить дефекты с вертикальным размером 10...15 % от толщины изделия на глубине залегания до 20.. 25 мм.

Методы магнитной дефектоскопии различаются по средствам преобразования магнитного поля (дефекта) в электрический или оптический сигналы. В настоящее время разработаны и применяются магнитные дефектоскопы, в которых используются много новых преобразователей магнитного поля в электрический сигнал: полупроводниковые преобразователи, датчики Холла, магнитодиоды др.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие способы намагничивания применяются при магнитном контроле?
2. Как влияет содержание углерода на магнитные свойства стали?
3. Какие дефекты могут быть идентифицированы оптимально при условии использования магнитного порошка с размерами частиц 100 мкм?
4. Как называются материалы, которые слабо отталкиваются от магнита?

6. ВИХРЕТОКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Методы, основанные на использовании вихревых токов, могут быть применены во время контроля электропроводящих изделий при выявлении дефектов, неоднородностей структуры и отклонений от химического состава. Методы вихревых токов наиболее эффективны при выявлении дефектов, расположенных вблизи поверхности изделия. Результаты испытаний могут послужить лишь для косвенной оценки исследуемых характеристик изделия; в каждом конкретном случае должно быть установлено соотношение между измеряемыми величинами и этими характеристиками.

Когда к поверхности металлического изделия подносится катушка, по которой протекает переменный электрический ток с наведенным в ней переменным магнитным потоком Φ_0 , то в металле возбуждаются вихревые токи. Величина возбуждаемых (наведенных) вихревых токов зависит от величины и частоты переменного тока, электропроводности, магнитной проницаемости и формы изделия, а также от наличия в изделии неоднородностей или несплошностей.

Условная глубина проникновения для плоского проводника в однородном поле определяется как глубина, на которой величина тока становится равной $1/e$ (37 %) своего значения на поверхности. Для неоднородных полей и проводников, форма которых отличается от плоской, характер распределения вихревых токов несколько иной.

Величина наведенных вихревых токов может быть вычислена на основании закона индукции Фарадея, она зависит от частоты тока, магнитной проницаемости материала и удельной электрической проводимости. Чем больше частота возбуждения, электропроводимость или магнитная проницаемость материала, тем меньше глубина, на которой могут быть наведены вихревые токи в металле. Для ферромагнитных металлов, имеющих величину $\mu = 1$, желательная глубина проникновения может быть достигнута выбором необходимой частоты. Для ферромагнитных металлов, характеризующихся высоким значением μ , проникновение мало даже при весьма низких частотах.

С целью увеличения глубины проникновения и повышения эффективности контроля надо снизить эффективную величину магнитной проницаемости, создавая в материале изделия магнитное насыщение.

Информацию о свойствах изделия датчик получает через магнитный поток Φ_v , образуемый вихревыми токами с плотностью тока j_v . Векторы напряженности возбуждающего поля H_0 и поля вихревых

токов H_v направлены навстречу друг другу. Электродвижущая сила в обмотке датчика в каждый момент времени пропорциональна разности потоков $\Phi_0 - \Phi_v$. Регистрируя приращение комплексного сопротивления параметрической катушки или приращение комплексного напряжения на выходе трансформаторного преобразователя, судят о результатах испытаний.

Нарушение сплошности является препятствием для вихревых токов, их действие эквивалентно увеличению сопротивления поверхностного слоя металла и приводит к изменению сигнала датчика. Если под датчиком окажется длинная глубокая трещина Γ (рис. 6.1), то контур вихревых токов, представляющий собой при отсутствии трещины окружность (рис. 6.1, а), разделится ею на две части (рис. 6.1, б).

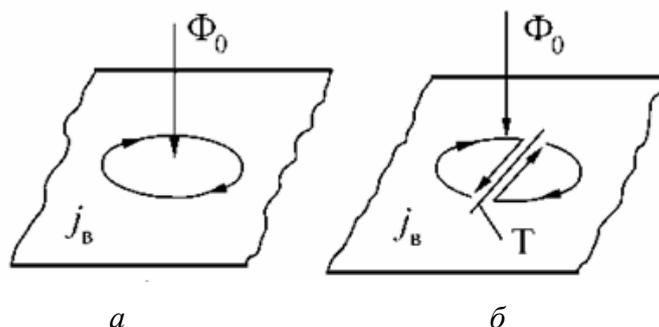


Рис. 6.1. Схема формирования поля вихревых токов при наличии трещин

Вихревые токи вдоль трещины идут в противоположных направлениях, образуя дополнительное магнитное поле дефекта, которое и обуславливает приращение сигнала датчика. По изменению фазы тока в катушке можно определить наличие дефекта.

Когда измерительная катушка подносится к поверхности проводника, сопротивление катушки претерпевает определенные изменения. Анализ этого изменения крайне усложнен вследствие большого числа переменных, от которых зависит указанная величина. Сопротивление изменяется по амплитуде и фазе; график, показывающий характер этих изменений, носит название «диаграмма годографа».

Методика контроля (рис. 6.2) включает в себя следующие операции:

1) внешний осмотр изделия и устранение наружных дефектов, мешающих контролю;

- 2) установление полезадающей системы *1* на контролируемое изделие *2* и пропускание тока через возбуждающую катушку;
- 3) сканирование датчика *3* и регистрирующих приборов *4, 5* вдоль поверхности контролируемого объекта;
- 4) расшифровку результатов контроля и оценку качества изделия.

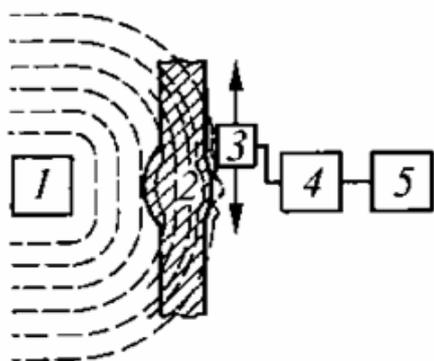


Рис. 6.2. Схема электромагнитного контроля

На чувствительность вихретокового метода значительно влияют зазор между датчиком и поверхностью контролируемого изделия, их взаимное расположение, форма и размеры. С увеличением зазора резко падает чувствительность метода. Допускаемый максимальный зазор составляет 2 мм. Структурная неоднородность также снижает чувствительность метода к обнаружению дефектов. Этим методом удается выявить поверхностные и подповерхностные трещины глубиной 0,1...0,2 мм и протяженностью более 1 мм, расположенные на глубине до 1 мм.

Перечисленные геометрические факторы обусловили ряд новых возможностей вихретокового метода: измерение толщины слоя гальванических, лакокрасочных, теплоизоляционных покрытий и пленок, определение толщины труб, пустотелых деталей и других тонколистовых изделий при одностороннем доступе к ним, измерение диаметра прутков и проволоки.

Вихретоковые методы подразделяют по полезадающим системам. Последние могут быть проходные, если катушка с током охватывает деталь или вставляется в нее, и накладные, когда катушку с током устанавливают на деталь торцом (рис. 6.3).

Измерительные катушки (датчики) могут выполняться отдельно от полезадающих (генераторных) и обычно располагаются недалеко от поверхности объекта контроля.

Накладные преобразователи изготавливают с ферромагнитным сердечником или без него. Ферромагнитный сердечник (обычно ферритовый) повышает абсолютную чувствительность преобразователя и уменьшает зону контроля за счет локализации магнитного потока.

Проходные вихретоковые преобразователи (ВТП) подразделяют на наружные и внутренние. Такая классификация проходных преобразователей основана на том, что они в процессе контроля проходят или снаружи объекта, охватывая его, или внутри объекта.

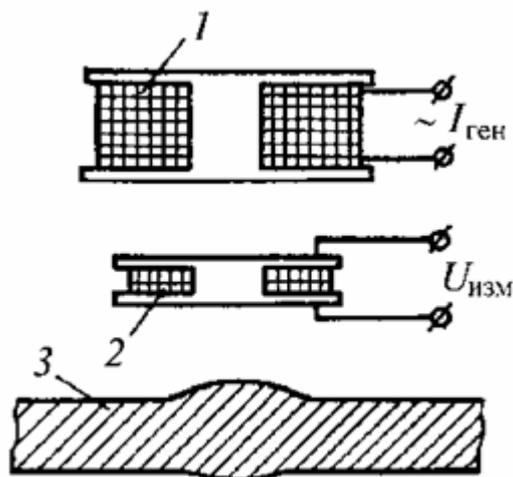


Рис. 6.3. Схема регистрации параметров электромагнитного поля:

1 – полезадающая (генераторная) катушка;
2 – измерительная катушка; 3 – контролируемое изделие

Накладные ВТП применяют в основном при контроле качества объектов с плоскими поверхностями и объектов сложной формы, а также в тех случаях, когда требуется обеспечить локальность и высокую чувствительность.

Наружные проходные ВТП используют при контроле линейно-протяженных объектов (проволоки, прутка, трубы и т. д.), а также при массовом контроле мелких изделий. Внутренними проходными ВТП контролируют внутренние поверхности трубы, а также стенки отверстий в различных деталях.

Контрольные вопросы и задания

1. Как изображают импеданс электромагнитной катушки графически?
2. Какие материалы не могут быть объектами вихретокового контроля?
3. Когда применяется амплитудный способ выделения информации при вихретоковом контроле?
4. Каким способом можно повысить отношение сигнал/шум при контроле ферромагнитных ОК?
5. Расскажите о преимуществах и возможностях применения вихретоковых преобразователей.

7. КАПИЛЛЯРНЫЕ МЕТОДЫ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Капиллярные методы НК основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Капиллярный НК предназначен для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности (для дефектов типа трещин) и ориентации по поверхности. Этот вид контроля позволяет диагностировать объекты любых размеров и форм, изготовленные из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, стекла, керамики, а также других твердых неферромагнитных материалов.

Метод применяют также для объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достичь требуемой чувствительности или магнитопорошковый метод контроля невозможно применить по условиям эксплуатации объекта.

Изображение, образованное пенетрантом в месте расположения несплошности и подобное форме сечения у выхода на поверхность объекта контроля, называют индикаторным рисунком или следом. Применительно к несплошности типа единичной трещины вместо термина «индикаторный рисунок» допускается применение термина «индикаторный след».

Капиллярные методы контроля подразделяют в зависимости от типа проникающего вещества на следующие:

– *метод проникающих растворов* – жидкостный метод капиллярного НК, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора;

– *метод фильтрующихся суспензий* – жидкостный метод капиллярного НК, когда в качестве жидкого проникающего вещества служит индикаторная суспензия, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы.

Капиллярная дефектоскопия заключается в капиллярном проникновении индикаторных пенетрантов во внутреннюю полость дефектов, сорбции и диффузии, яркостном и цветовом контрастах дефектоскопических материалов.

Размеры дефектов, которые должны быть выявлены методами капиллярной дефектоскопии, так малы, что обнаружить их невооруженным глазом практически невозможно. Дефект на поверхности объекта контроля можно заметить в том случае, если имеется яркостный колористический контраст между самим дефектом и бездефектной частью контролируемого изделия – фоном поверхности, причем если фон темный, то дефекты должны быть светлыми и наоборот.

Поэтому для обнаружения дефектов невооруженным глазом следует искусственно повысить контрастность дефектного и неповрежденного участков контролируемой поверхности. Это достигается изменением светопоглощения и светоиспускания поверхностей после нанесения специальных индикаторных пенетрантов.

Основная задача капиллярной дефектоскопии – заполнение полостей дефектов специальными свето- и цветоконтрастными индикаторными пенетрантами, используя при этом капиллярные явления.

Значения краевых углов при смачивании и несмачивании зависят от соотношения сил притяжения между молекулами твердого тела и жидкости и сил межмолекулярного притяжения в жидкости.

Если силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше этих же сил между молекулами самой жидкости, то жидкость хорошо смачивает поверхность твердого тела, образует с ним устойчивую поверхность раздела, т. е. прилипает к нему.

Диаметр пятна, образованного строго дозированной каплей смачивающей жидкости, скорость, с которой фронт пятна наступает на чистую поверхность твердого тела, а также характер изменения этой скорости могут быть приняты за *меру смачивания* жидкостей, применяемых для капиллярных методов дефектоскопии.

Степень смачивания жидкости зависит от ее вязкости, плотности, летучести и характеризуется максимальной высотой растекающегося пятна жидкости, по которому судят о смачивании одной и той же жидкостью разных твердых тел. Лучшее смачивание обеспечивают жидкости с малым поверхностным натяжением, что в первую очередь должно учитываться при выборе жидкостей для капиллярных методов дефектоскопии.

Наряду с этими факторами на смачивание существенно влияет шероховатость поверхности. Чем она больше, тем лучше смачивание. У стенок дефектов (трещин) шероховатость выше, чем у контролируемой поверхности, поэтому считается, что при капиллярных методах дефектоскопии в полостях дефектов у жидкостей будет более высокая смачивающая способность по отношению к твердому телу.

Проникновение индикаторных пенетрантов в мелкие поверхности несплошности затруднено из-за наличия в них воздушных пробок, создающих противодействие капиллярным силам. В связи с этим время проникновения индикаторных пенетрантов в дефекты достигает нескольких минут. Это необходимо учитывать при определении момента, когда поверхности контролируемых изделий можно очищать от избытка индикаторного пенетранта.

Для отыскания дефекта следует возможно большее количество индикаторного пенетранта, находящегося в его микрополости, извлечь на поверхность, подвергаемую осмотру. В этом состоит следующая задача капиллярных методов дефектоскопии.

Извлечение и локализация пенетранта у кромок поверхностных и сквозных дефектов достигаются сорбционными свойствами проявителей пенетранта.

При физической адсорбции молекулы индикаторного пенетранта сохраняют свое первоначальное строение, а при химической адсорбции образуют на контролируемой поверхности изделия химическое соединение с проявителем пенетранта.

При использовании в качестве проявителя красок и лаков наблюдается абсорбция жидкости: проявитель, находящийся над дефектом, поглощает находящуюся в полости дефекта жидкость (индикаторный пенетрант), и она растворяется в проявителе. При наличии в последнем частиц твердого пигмента процесс поглощения жидкости (индикаторного пенетранта) связан с адсорбцией и абсорбцией.

Если в ходе проявления дефекта жидкость имеет высокую летучесть, и проявитель быстро сохнет, то над дефектом образуется стабильный индикаторный след, длительное время сохраняющий свою форму и цвет. При использовании малолетучей жидкости или медленно сохнущего проявителя на контролируемой поверхности изделия возникает нестабильный, расплывающийся со временем индикаторный след.

Скорость сорбционных процессов в проявителе главным образом зависит от скорости диффузии жидкости и растворенных в ней веществ в слой проявителя. При повышении температуры коэффициент диффузии увеличивается, что ускоряет выявление дефектов в том случае, если жидкость не испаряется. Для летучей жидкости потеря ее массы вследствие испарения может превышать прирост поступления в проявитель индикаторной жидкости, что приведет к ухудшению выявляемости дефектов.

Капиллярные методы в зависимости от способа выявления индикаторного рисунка подразделяют:

– на *люминесцентный* (Л), основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом ультрафиолетовом (УФ) излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

– *цветной* (Ц), состоящий в регистрации контраста цветного в видимом излучении индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля;

– *люминесцентно-цветной* (ЛЦ), заключающийся в регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности объекта контроля в видимом или длинноволновом УФ излучении;

– *яркостный* (Я), основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности объекта контроля. Л и ЛЦ методы контроля проводят при облучении изделий УФ лучами. Это невидимые лучи, расположенные за крайней фиолетовой частью спектра, которые обладают ярко выраженным химическим действием и имеют длину волны $T8U... 400$ нм. При Л методе контроля с визуальным способом обнаружения дефектов применяют УФ излучение с длиной волны $3T5...400$ нм.

При облучении контролируемой поверхности УФ лучами многие вещества их поглощают и начинают испускать видимый свет.

Если между моментом поглощения энергии телом и ее выделением в виде излучения проходит измеримый промежуток времени, то это излучение и вызванное им свечение называются люминесцентными.

Люминесценция, которая прекращается сразу после того, как заканчивается действие возбудителя свечения, именуется флуоресценцией. Люминесценция, длительное время сохраняющаяся после прекращения действия возбудителя свечения, называется фосфоресценцией.

При люминесцентном контроле некоторые вещества, поглощая световую энергию УФ невидимого спектра, отдают ее как видимое световое излучение. Это явление называется фотолюминесценцией. Как правило, при фотолюминесценции твердых веществ и жидкостей наблюдается излучение более длинных волн, чем у поглощенного излучения. При УФ облучении фотолюминесцентное излучение возникает в видимой части спектра, происходит как бы трансформация

излучения. Эта особенность фотолюминесценции описывается правилом Стокса: спектр фотолюминесценции сдвинут в сторону длинных волн по сравнению со спектром поглощенного излучения.

Для проведения капиллярных методов НК необходимо иметь взаимозависимое сочетание дефектоскопических материалов: индикаторного пенетранта, проявителя, очистителя и гасителя.

Индикаторный пенетрант – капиллярный дефектоскопический материал, обладающий способностью проникать в несплошности объекта контроля и индицировать их.

Проявитель пенетранта – капиллярный дефектоскопический материал, служащий для извлечения индикаторного пенетранта из капиллярной полости дефекта с целью образования четкого индикаторного рисунка следа дефекта.

Очиститель от пенетранта – капиллярный дефектоскопический материал, предназначенный для удаления индикаторного пенетранта с поверхности объекта контроля самостоятельно или в сочетании с органическим растворителем или водой.

Гаситель пенетранта – состав, предназначенный для устранения фоновой окраски при Ц методе контроля или люминесценции при Л и ЛЦ методах контроля остатков индикаторного пенетранта на контролируемой поверхности.

Наборы дефектоскопических материалов для каждого метода капиллярной дефектоскопии выбирают исходя из требуемой чувствительности, производительности контроля и возможности его автоматизации и механизации, стабильности качества материалов в условиях применения и хранения, химической инертности материалов по отношению к контролируемым изделиям.

При прочих равных условиях предпочтение следует отдавать нетоксичным или малотоксичным материалам, негорючим и не вызывающим коррозии составам.

В некоторых наборах дефектоскопических материалов отдельные составы можно заменять другими после опробования или исследования совместимости последних с остальными материалами набора. Иногда один и тот же состав (особенно очистители и проявители пенетрантов) применяют в разных дефектоскопических комплектах.

Дефектоскопические материалы токсичны и высыхают со временем, поэтому обычно их хранят расфасованными в полиэтиленовой или коррозионно-стойкой металлической посуде с пробками или плотно завинчивающимися крышками.

В последнее время для контроля качества деталей и сварных соединений в производственных условиях методами капиллярной дефектоскопии нашел широкое применение аэрозольный способ нанесения дефектоскопических материалов на контролируемую поверхность изделия с использованием аэрозольных баллонов.

При контроле основного металла деталей изделий применяют капиллярные дефектоскопы различных типов, состоящие из приборов и вспомогательных средств, позволяющих дефектоскописту, используя набор дефектоскопических материалов, осуществлять весь технологический процесс капиллярной дефектоскопии.

Дефектоскопы изготавливают в следующих вариантах: переносные, передвижные и стационарные. Переносные дефектоскопы применяют для контроля конструкций, трубопроводов и оборудования в цеховых, монтажных и ремонтных условиях. Передвижные и стационарные дефектоскопы предназначены только для капиллярного НК изделий в цехах, где налажено поточное производство.

В зависимости от функционального назначения и эксплуатационной законченности дефектоскопы включают в себя полностью или частично такие функциональные устройства, как:

- подготовка объектов к контролю;
- обработка объектов дефектоскопическими материалами;
- выявление дефектов;
- контроль качества дефектоскопических материалов;
- контроль УФ, видимого, теплового и других используемых излучений;
- контроль технологических процессов подготовки объектов и обработки их дефектоскопическими материалами.

Основные технологические операции методов капиллярного НК деталей, сборочных единиц и изделий заключаются:

- в подготовке дефектоскопических материалов и проверке их качества;
- подготовке изделий к контролю, их очистке и обезжиривании;
- сушке изделий и удалении растворов из полости дефектов;
- нанесении на контролируемую поверхность изделия индикаторного пенетранта;
- удалении избытка пенетранта с контролируемой поверхности изделия;
- нанесении проявителя пенетранта и выдержке, необходимой для того, чтобы проявитель вытянул пенетрант на поверхность из полости дефектов;

- обнаружении дефектов при наблюдении контролируемой поверхности изделия в темноте, в УФ или видимом свете;
- разметке дефектов и оценке качества изделия;
- удалении проявителя и следов других дефектоскопических материалов с контролируемой поверхности изделия.

Отдельные из перечисленных операций при контроле по той или иной конкретной технологии Л, Ц или ЛЦ методов могут быть исключены из технологического процесса.

Перед производственным контролем осуществляют подготовку дефектоскопических материалов и проверку их качества. Дефектоскопические материалы подвергают входному контролю: проверяют наличие паспортов заводов-изготовителей на дефектоскопические наборы, а также соответствие государственным стандартам или техническим условиям.

При проверке дефектоскопических материалов применяют обычно не менее двух образцов-имитаторов с трещинами одинакового характера и примерно равных размеров. Один образец рабочий, его используют постоянно, второй – служит эталонным при неудовлетворительном выявлении трещин на рабочем образце-имитаторе.

Конструкция и методика изготовления образцов-имитаторов должна соответствовать требованиям ГОСТ 23349–78. К образцам-имитаторам должны быть приложены паспорта с фотографиями и эскизами индикаторных следов в УФ (если образцы применяют при Л и ЛЦ методах) и видимых (при Ц методе) областях спектра.

После окончания работы вторично проверяют дефектоскопические материалы на рабочем образце-имитаторе. Если при этом на нем не удастся выявить искусственные дефекты, то контроль нужно провести на эталонном образце. Если на эталонном образце трещины также не будут выявлены, то дефектоскопические материалы признают негодными и заменяют новыми, а также повторно контролируют все проконтролированные в течение работы детали, сборочные единицы или сварные соединения изделий данным набором с помощью вновь приготовленных дефектоскопических материалов. Если на эталонном образце трещины выявляются удовлетворительно, значит рабочий образец-имитатор загрязнен и подлежит очистке или замене.

После нанесения проявителя изделие выдерживают при температуре окружающей среды или высушивают до окончания процесса проявления, т. е. образования индикаторного следа в местах наличия дефекта.

Существуют следующие способы проявления индикаторных следов дефектов: временной, тепловой, вакуумный и вибрационный. При производственном контроле дефекты проявляют в основном временным и тепловым способами или тем и другим одновременно. Продолжительность выдержки контролируемого изделия зависит от физических свойств дефектоскопических материалов, температуры окружающей среды и выбирается экспериментально такой, чтобы обеспечить максимальную чувствительность контроля и наибольшую четкость индикаторных следов дефектов.

Осмотр контролируемых поверхностей и анализ индикаторных следов дефектов обычно проводятся дважды: через 3...5 мин и через 15...20 мин после высыхания проявителя. Повторный осмотр необходим для выявления наиболее тонких и малых по размерам дефектов с небольшим раскрытием.

Осмотр деталей и сварных соединений проводят в три этапа. Сначала визуально оценивают качество нанесенного слоя проявителя, затем осуществляют общий осмотр поверхности в целях обнаружения индикаторных следов от дефектов, после этого анализируют и оценивают выявленный индикаторный след.

При осмотре изделий отыскивают окрашенный или люминесцирующий индикаторный след от дефекта, обращая внимание на следующие его признаки:

- трещины, непровары, несплавления, оксидные пленки проявляются в виде четких, резких, иногда прерывисто окрашенных или люминесцирующих линий различной конфигурации;
- поры и язвенная коррозия имеют вид расплывшихся отдельных точек и пятен; при этом интенсивность окраски различная: более глубокие поры более яркие, менее глубокие – менее яркие;
- межкристаллитная коррозия проявляется чаще всего как межзеренная мелкая сетка (у материала с крупнозернистой структурой);
- коррозионное растрескивание представляет собой мелкую сетку в виде пауков.

Индикаторный след на контролируемом изделии помимо дефектов может быть также образован загрязнениями. Обнаружение индикаторного следа на контролируемой поверхности еще не является основанием для бракования изделия. Дефектоскопист должен на основе анализа индикаторного следа оценить, есть ли дефект и каковы его характеристики, и только после этого браковать изделие.

Чувствительность метода капиллярной дефектоскопии условно определяется наименьшими значениями раскрытия надежно выявляемого дефекта типа трещины по его индикаторному следу и зависит от свойств применяемых дефектоскопических материалов; качества и состояния контролируемой поверхности, а также условий контроля.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие виды дефектов нельзя обнаружить капиллярными видами контроля?
2. Какие факторы технологии контроля могут вызвать появление ложной индикации?
3. Способ применения цветовой индикации при капиллярном контроле?
4. Как происходит индикация дефектов при нанесении пенетранта на поверхность ОК?
5. Что называют пропитка пенетрантом при атмосферном давлении?
6. По каким показателям осуществляют оценку допустимости выявленных при капиллярной дефектоскопии дефектов?
7. Расскажите об особенностях применения аэрозольных комплектов.

8. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Важнейшим эксплуатационным требованием для изделий замкнутых объемов (баки, цистерны, резервуары, газопроводы и т. д.) является герметичность.

Герметичность – это способность изделия сохранять в рабочих условиях начальное количество содержащихся в нем веществ.

Контроль герметичности изделий основан на проникновении пробных веществ (газов или жидкостей) через сквозные дефекты (течи) и их регистрации с помощью различных приборов, например, течеискателей и других средств регистрации индикаторных веществ.

Как известно, газ – это агрегатное состояние вещества, при котором межмолекулярное взаимодействие между частицами-молекулами или атомами отсутствует, и объем, занимаемый собственно молекулами, мал, по сравнению с объемом, свободным от них.

Жидкость – это физическое тело, обладающее текучестью, крайне мало изменяющее свою плотность при изменении давления.

Пробным называют вещество, избирательно регистрируемое при данном методе контроля, например гелий при масс-спектрометрическом контроле, фреон при галогенном и т. д. Контрольным веществом называют смесь пробного вещества с каким-либо технологически и экономически целесообразным наполнителем, например гелиево-воздушную или гелиево-азотную смесь при масс-спектрометрическом контроле.

В качестве пробных и контрольных веществ при контроле герметичности используют газы и их смеси (воздух, гелий, фреон, аргон, азот, оксид азота, аммиак, радиоизотопные газы), а также жидкости и их смеси (водные растворы аммониевой и натриевой солей флуоресцина, различные органические растворы люминофоров, воду с хромпиком, керосин, керосин с люминофором, гидросмеси с люминофором, обессоленную воду с люминофором, спирт с люминофором, жидкости, газированные оксидом азота или пробным газом для газолюминесценции и др.).

Методы и способы контроля герметичности изделий по эффективности их использования позволяют проводить как качественную, так и количественную оценку утечки газов и жидкостей. Степень герметичности изделий количественно характеризуется интегральным (суммарным) потоком пробного вещества в пересчете на поток воздуха, который вытекает за единицу времени из атмосферы в вакуум

через все имеющиеся в изделии сквозные дефекты – течи при нормальных условиях.

Течь – это канал или пористый участок изделия либо его элементов, нарушающих их герметичность. Как правило, малые характерные размеры течей исключают возможность их визуального наблюдения или обнаружения всеми другими методами дефектоскопии. Величину течей принято определять потоками проникающих через них веществ.

Контроль герметичности изделий проводят в тех случаях, когда они предназначены для работы под давлением газов или жидкостей. Необходимость контроля, методы и способы испытаний на герметичность и их объем устанавливается в технической документации в зависимости от назначения, условий работы изделия и выполнимости тех или иных методов и способов.

Существующие методы контроля герметичности можно условно подразделить на газовые, жидкостные, газожидкостные и технологические.

Газовые – это методы и способы контроля герметичности, определяющие утечку пробного через течи изделия при создании в контролируемом изделии избыточного давления или вакуума с применением пробного газа.

Жидкостные методы и способы контроля герметичности основаны на определении утечки пробных веществ (жидкостей или их смесей с различными индикаторными добавками) при атмосферном или избыточном давлении.

К газожидкостным относятся методы и способы контроля герметичности, основанные на определении утечки пробных веществ – газов или жидкостей, находящихся под избыточным давлением или вакуумом и проникающих через сквозные дефекты сварных соединений путем регистрации их пузырьков на поверхности изделия.

С помощью технологических методов и способов контроля герметичности изделий можно определять утечку пробных веществ посредством вскрытия или вырезки проблемных участков изделия или соединений для определения внутренних дефектов или изготовления испытательных (контрольных) образцов и последующего их исследования.

Самой важной характеристикой каждого метода или способа контроля герметичности является его чувствительность, которая характеризуется минимальным надежно регистрируемым потоком пробного вещества (табл. 8.1).

**Предельные значения чувствительности
методов контроля герметичности**

Метод контроля	Чувствительность, мм ³ ·МПа/с	Метод контроля	Чувствительность, мм ³ ·МПа/с
Акустический	$1 \cdot 10^{-2}$	Гидравлический	$5 \cdot 10^{-3}$
Капиллярный	$1 \cdot 10^{-3}$	Манометрический	$5 \cdot 10^{-2}$
Газоаналитический	$4 \cdot 10^{-4}$	Галогенный	$1 \cdot 10^{-6}$
Химический	$2 \cdot 10^{-5}$	Масс-спектро- метрический	$6,6 \cdot 10^{-8}$
Пузырьковый	$1 \cdot 10^{-5}$	Радиационный	$1 \cdot 10^{-11}$

При определении течей течеискателями чувствительность последних определяют в зависимости от давления, величины потока или концентрации пробного газа.

Прохождение жидкостей и газов через такие дефекты подчиняется в основном законам молекулярно-кинетической теории и гидроаэромеханики. Молекулярно-кинетическая теория позволяет изучить разнообразные физические явления, происходящие при прохождении жидкостей и газов через дефекты, а гидроаэромеханика рассматривает законы равновесия и движения жидкостей и газов, а также их взаимодействие с твердыми телами.

Давление газа или *жидкости* с позиции кинетической теории есть суммарный импульс силы, который сообщается в результате теплового движения молекул газа или жидкости единице поверхности в единицу времени.

Тепловое движение молекул газов и жидкостей в цилиндрическом канале сопровождается не только ударами молекул о стенки канала, но и их взаимными столкновениями. Вследствие этого путь молекулы – это пространственная ломаная линия, прямолинейные участки которой соответствуют ее свободному пути (без столкновений), а повороты, где она меняет свое направление, моментам столкновения с другой молекулой.

Для упрощения расчета потока течь представляют в виде гладкого цилиндрического канала (эффективный диаметр d_3 течи).

Поскольку тепловое движение молекулы в канале (течи) беспорядочно, прямолинейные участки ее пути не могут быть одинаковыми, поэтому вводят понятие *средняя длина свободного пути молекулы*, т. е. среднее расстояние, проходимое молекулой между двумя столкновениями.

В зависимости от соотношения средней длины свободного пути молекул и эффективного диаметра канала различают три режима течения газов: вязкостный ($\lambda_m \ll d_3$), молекулярно-вязкостный ($\lambda_m \sim d_3$), молекулярный ($\lambda_m > d_3$). Условию $\lambda_m \ll d_3$ отвечают сверх- и макрокапиллярные течи. Условие $\lambda_m > d_3$ справедливо для микрокапиллярных течей. Полный переход от вязкостного режима течения газа к молекулярному происходит в интервале давлений примерно в 2 порядка, причем при условии $\lambda_m \sim d_3$ для макрокапиллярных течей приведенные выше соотношения неприменимы.

Молекулы жидкостей значительно крепче связаны друг с другом, чем молекулы газа. Для жидкостей условие $\lambda_m \ll d_3$ справедливо также в сверх- и макрокапиллярных течах.

Через микрокапиллярные течи жидкость может проходить и при отсутствии внешнего перепада давления за счет сил поверхностного натяжения и создаваемого ими капиллярного давления, адсорбции и других физических явлений.

При взаимодействии газов с твердым телом происходят одновременно два явления: сорбция (адсорбция и абсорбция) и десорбция. *Адсорбция* – поглощение газа путем удержания его на поверхности твердого тела (адсорбента), а *абсорбция* – это поглощение газа твердым телом (абсорбентом). *Десорбция* – выделение газа из твердого тела.

Теория процессов сорбции и десорбции показывает, что для уменьшения количества газа, адсорбированного на поверхности, при применении вакуумных методов контроля необходимо повышать температуру испытуемого изделия.

8.1. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Масс-спектрометрический метод контроля герметичности изделий широко применяют при испытании газовых, гидравлических и других систем для определения локальных и интегральных утечек замкнутых и открытых конструкций, в которых можно создать избыточное давление или вакуум. Этот метод основан на регистрации ионов пробного газа, проходящего через сквозные дефекты контролируемого изделия с помощью масс-спектрометров.

В качестве пробных газов при масс-спектрометрическом методе контроля герметичности широкое применение нашел гелий, поскольку он химически инертен, не образует с элементами химических

соединений, безвреден и безопасен. В качестве контрольного газа применяют либо чистый гелий, либо его смесь с воздухом или азотом при 10...75 % He.

В настоящее время в практике широкое распространение получили статические масс-спектрометры, разделение ионов в которых осуществляется с помощью постоянных или медленно изменяющихся магнитного и электрического полей, причем период изменения полей намного больше времени движения ионов в анализаторе. Образовавшиеся в масс-спектрометре положительные ионы разделяются по характерному для каждого из них отношению массы иона M к его заряду e . Отношение M/e носит название «массовое число иона». Основными параметрами масс-спектрометров являются чувствительность, разрешающая способность, диапазон анализируемых масс и минимальное регистрируемое давление.

Чувствительность определяется минимальным регистрируемым парциальным давлением газа и зависит от характеристик датчика масс-спектрометра и возможностей измерительной схемы. Для статических масс-спектрометров чувствительность выражается в единицах на паскаль или амперах на паскаль, а также в долях процента и показывает, какую долю каждого компонента газа способен обнаружить данный прибор. Чувствительность масс-спектрометров неодинакова для разных газов.

Разрешающая способность представляет собой отношение массового числа M к наименьшему различаемому его изменению ΔM , т. е. она численно равна массовому числу, при котором могут быть полностью разделены соседние массы, отличающиеся друг от друга на единицу, и составляет для статических масс-спектрометров больше 30 ед.

Диапазон анализируемых масс для вакуумных измерений составляет 2...100. Нижняя граница рабочего диапазона определена трудностью выделения небольшого пика рабочего газа над фоновым отсчетом (сигнал / шум), а верхняя определяется отклонением от линейного закона зависимости тока ионов анализируемого компонента от давления и, соответственно, равна для статических масс-спектрометров 10^{-2} ... 10^{-9} Па.

Для обнаружения гелия при контроле герметичности изделий применяют гелиевые масс-спектрометрические течеискатели.

Масс-спектрометрический течеискатель состоит из трех основных частей: анализатора (масс-спектрометрической камеры с магнитом), вакуумной системы и электрических блоков питания и измерения.

Градуировку течеискателя и определение чувствительности метода нужно проводить перед началом контроля герметичности изделий с применением специальной калиброванной течи. Поэтому чувствительность гелиевых масс-спектро-метрических течеискателей, обладающих собственной вакуумной откачной системой и фиксированным рабочим давлением, выявляют двумя способами:

- по потоку гелия через калиброванную диффузионную течь известных размеров;
- по смеси известной концентрации.

Настройку гелиевых течеискателей на определенную чувствительность проводят с помощью диффузионной течи типа «Гелит».

Действие калиброванных течей в масс-спектрометрических гелиевых течеискателях основано на диффузии гелия сквозь мембрану, изготовленную из плавленого кварца или молибденового стекла. В комплектах течеискателей всех типов, выпускаемых промышленностью, имеются две гелиевые течи.

Одна из них встроена в вакуумную систему и предназначена для определения реальной чувствительности течеискателя. Величина потока встроенной гелиевой течи имеет пределы $1 \cdot 10^{-5} \dots 6,6 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

Вторую гелиевую течь прикладывают к течеискателю вместе с насадкой, устанавливаемой на течи с помощью специального уплотнения. Насадка позволяет зафиксировать положение всасывающего сопла щупа на определенном расстоянии от сквозного дефекта, через который истекает гелиево-воздушная смесь. При этом поток гелия равен величине, указанной в паспорте калиброванной течи, с учетом поправки на время изготовления течи. Величина потока, проходящая через течь, составляет $6,6 \cdot 10^{-5} \dots 1 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

При испытании на герметичность масс-спектрометрическим методом используют четыре основных способа: обдув, вакуумирование, гелиевый щуп (зондирование) и опрессовку.

Способ обдува. Испытуемое изделие непрерывно вакуумируется вспомогательным насосом или насосами (рис. 8.1). Проба откачиваемого газа непрерывно подается в течеискатель через дросселирующий клапан. Последний используется для регулирования количества газа, чтобы не превышалось рабочее давление течеискателя (допускается работа при повышенных давлениях, но в этом случае чувствительность уменьшается).

Чтобы обнаружить утечки, внешнюю поверхность изделия с помощью полой иглы обдувают тонкой струей гелия. Гелий втягивается в любое отверстие в стенках изделия, и его следы регистрируются

течеискателем в виде визуального или звукового сигнала. Использование тонкой струи гелия дает возможность точно определить размеры и положение отверстия или отверстий.

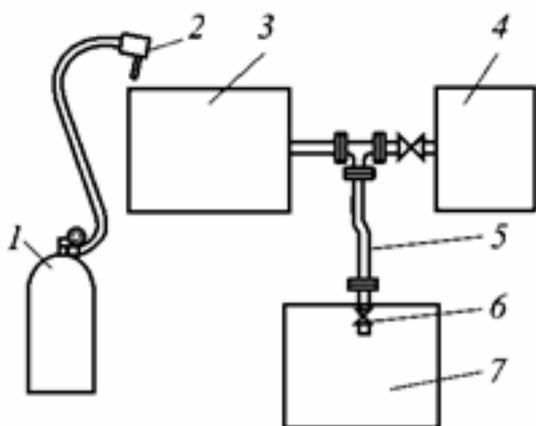


Рис. 8.1. Контроль на герметичность с помощью гелиевого течеискателя методом обдува:

1 – баллон с гелием; 2 – головка с соплом; 3 – испытуемая система; 4 – вспомогательный насос; 5 – гибкий шланг; 6 – дросселирующий клапан; 7 – течеискатель

Если воздух, окружающий изделие, содержит большое количество гелия, то отыскание течи вследствие высокого фонового сигнала становится затруднительным. Размер отверстий, выявленных этим способом, может быть определен с помощью калиброванного отверстия: чувствительность способа $6,6 (10^{-7} \dots 10^{-9}) \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

При контроле способом обдува гелием поверхности изделия соединяются с течеискателем и вакуумируются до давления, которое дает возможность полностью открыть дросселирующий клапан течеискателя; после этого наружная поверхность изделия обдувается струей гелия. При наличии сквозного дефекта гелий попадает во внутреннюю полость изделия и фиксируется течеискателем.

Этот способ применяют для определения локальных дефектов в сварных соединениях. Скорость перемещения обдувателя по поверхности изделия должна быть 1 см/с. Чувствительность способа $6,6 (10^{-7} \dots 10^{-8}) \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

Способ вакуумирования. При контроле этим способом (гелиевой или вакуумной камерой) проверяемое изделие помещают в герметичную металлическую камеру. К камере или изделию через систему вспомогательной откачки подсоединяют течеискатель, после чего в камеру (способ гелиевой камеры) или в изделие (способ вакуумной камеры) подается под давлением гелий (рис. 8.2).

При наличии сквозного дефекта гелий в результате перепада давления поступает в вакуумированный объем, соединенный с течеискателем, и фиксируется стрелочным прибором выносного пульта управления течеискателя.

Чувствительность способа вакуумирования контроля герметичности $6,6(10^{-7} \dots 10^{-8}) \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

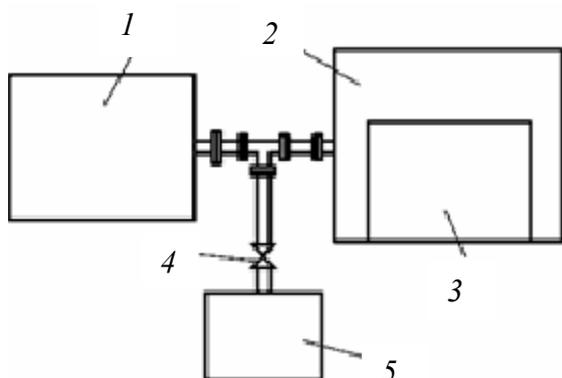


Рис. 8.2. Контроль на герметичность с помощью гелиевого течеискателя методом вакуумируемой камеры

Способ гелиевого щупа. При контроле герметичности этим способом изделие заполняется гелием или гелиево-воздушной смесью до давления, превышающего атмосферное, после чего наружная поверхность изделия контролируется специальным щупом-улавливателем, соединенным резиновым шлангом с течеискателем. В результате перепада давления гелий проникает через сквозной дефект, через щуп и шланг в камеру масс-спектрометра течеискателя (рис. 8.3).

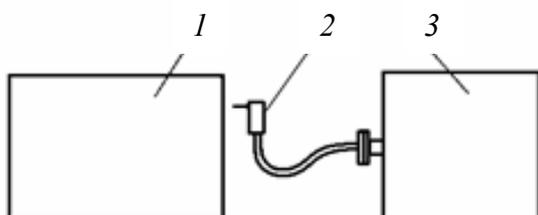


Рис. 8.3. Контроль на герметичность с помощью гелиевого течеискателя методом зондирования: 1 – система, заполненная гелиево-воздушной смесью под давлением; 2 – зонд с подсасывающим устройством; 3 – течеискатель

По поверхности сварного соединения щуп перемещается с постоянной скоростью, равной $0,1 \text{ см/с}$. Удаление щупа от контролируемой поверхности сварного соединения на 5 мм снижает выявляемость дефектов в 15 раз, поэтому при контроле щуп должен соприкасаться с контролируемой поверхностью.

Конструкция насадки гелиевого щупа должна соответствовать профилю проверяемого сварного соединения для создания под насадкой практически замкнутого объема. Если зона утечки обнаружена, насадку щупа заменяют на специальную, предназначенную для точного поиска местоположения дефекта.

Чувствительность способа гелиевого щупа от $6,6 (10^{-6} \dots 10^{-7}) \text{ мм}^3 \cdot \text{МПа/с}$.

Опрессовка может быть использована для испытания изделий, к которым нельзя присоединить течеискатель или источник гелия. Этот способ находит применение в области реакторостроения для обнаружения мельчайших трещин, отверстий и щелей в оболочках и концевиках тепловыделяющих элементов. По этому способу испытаний изделие помещают в емкость (рис. 8.4), содержащую гелий под давлением, и некоторое время выдерживают в гелиевой атмосфере (рис. 8.4, а). Затем изделие переносят во вторую камеру, соединенную с вакуумным насосом и гелиевым течеискателем (рис. 8.4, б). Камеру вакуумируют, после чего открывают дроссельный клапан на линии к течеискателю.

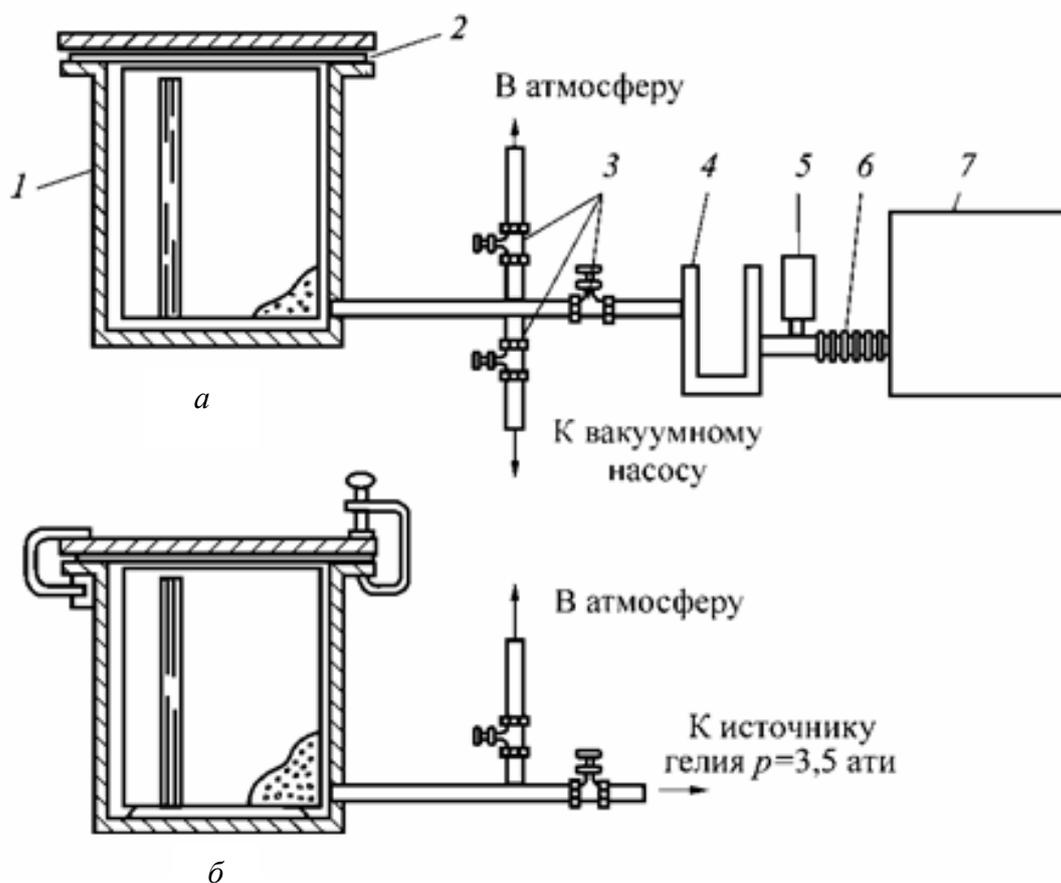


Рис. 8.4. Контроль на герметичность с помощью гелиевого течеискателя методом опрессовки:

a – схема установки; *б* – емкость для выдержки изделия при повышенном давлении; 1 – испытательная камера; 2 – кольцевая прокладка; 3 – герметические клапаны; 4 – холодная ловушка; 5 – вакуумметр; 6 – гибкая вакуумная линия; 7 – гелиевый течеискатель

Относительное количество высвободившегося гелия регистрируется на шкале течеискателя.

Масс-спектрометрические течеискатели. Для контроля герметичности сварных соединений широкое распространение получили масс-спектрометрические течеискатели ПТИ-7А, ПТИ-10 и СТИ-11 статического типа с фокусировкой ионных пучков в 180-градусном однородном поле, настроенные на регистрацию гелия. Эти течеискатели предназначены для испытаний на герметичность различных конструкций и трубопроводов, допускающих откачку внутренних полостей, а также заполненных гелием или смесью, содержащей гелий, в лабораторных, заводских и монтажных условиях. Течеискатели обеспечивают поиск локальных и интегральных утечек в контролируемых изделиях.

8.2. ГАЛОГЕННЫЙ МЕТОД

Галогенный метод контроля герметичности обладает высокой чувствительностью и применяется для обнаружения локальных и интегральных течей в закрытых конструкциях и изделиях, работающих под давлением: конденсаторов паровых турбин, дистилляционных емкостей, топливных и газовых систем и т. д. Галогенный метод основан на регистрации пробного газа по увеличению эмиссии ионов примесей щелочных металлов или по изменению цвета газового пламени в случае проникновения галогенов в сквозные дефекты контролируемого изделия.

В качестве пробного и контрольного веществ чаще всего применяют фреон-12, поскольку он неядовит и сравнительно дешев. Однако давление, которое можно создать в контролируемом изделии при использовании фреона-12, ограничивается упругостью его пара и при нормальной температуре составляет $-0,6$ МПа. По этой причине в диапазоне давлений $0,6...0,93$ МПа следует применять фреон-22, а в диапазоне $0,83...3,24$ МПа – фреон-13. Иногда применяют четыреххлористый углерод, хлористый метил, дихлорэтан и другие галогеносодержащие газы.

При давлениях, превышающих $0,6$ МПа, используют не чистый фреон, а его смесь с воздухом, но при этом чувствительность метода резко падает. Уменьшение чувствительности контроля в данном случае компенсируется повышением давления фреоно-воздушной смеси.

Регистрация пробных газов осуществляется с помощью галогенных течеискателей, обладающих небольшими габаритными размерами и массой, что в производственных условиях является

определяющим фактором. Галогенный течеискатель представляет собой устройство, состоящее из датчика (щупа) и измерительного блока.

Для обнаружения галогенных газов, содержащихся в анализируемых газоздушных смесях, используют детекторы трех видов:

- платиновые электроды, нагреваемые до температуры 1000...1200 К и изменяющие в присутствии галогенных газов эмиссию положительных ионов;

- датчики с открытым пламенем или факелом, изменяющим свой цвет и размер пламени в присутствии галогенных газов;

- датчики с высокочастотной газоразрядной трубкой, в которой при определенном вакууме в присутствии галогенных газов изменяются цвет и размер разряда.

Широкое распространение получили галогенные течеискатели, использующие детекторы с платиновыми электродами. В них используется галогенный эффект, основанный на свойстве накаливаемой до 1000...1200 К платины, в присутствии галогеносодержащих веществ резко увеличивать эмиссию положительных ионов и регистрировать ее с помощью электроизмерительных приборов. Возрастание эмиссии в галогенных течеискателях наблюдается во время работы прибора как при атмосферном давлении, так и в вакууме.

Чувствительным элементом галогенного течеискателя является датчик – платиновый диод с анодом, нагретым до высокой температуры (800...900 °С) прямым пропусканием постоянного тока.

Анодом-эмиттером, эмитирующим положительные ионы, служит платиновый цилиндр, нагреваемый платиновым подогревателем. С положительным полюсом источника постоянного тока анод связан через вторичную обмотку трансформатора накала, к отрицательному полюсу того же источника подсоединен цилиндрический коллектор ионов, изготовленный из коррозионно-стойкой стали и расположенный вокруг анода. При проникновении галогеносодержащих веществ в датчик увеличивается ионный ток анода, который затем регистрируется микроамперметром.

Обнаружение течей в сварных соединениях изделий с помощью галогенных течеискателей проводится методом опрессовки с использованием атмосферного щупа с датчиком, когда контролируемое изделие заполняется чистым фреоном или смесью фреона с воздухом до избыточного давления, а также методом обдува фреоном посредством вакуумного щупа с датчиком, когда в контролируемом изделии поддерживается определенное разрежение.

Чувствительность галогенного метода с использованием вакуумного датчика достигает 10^{-6} мм³ · МПа/с.

Манометрический метод контроля на герметичность изделий проводят, чтобы определить величину интегральных и локальных утечек в сварных соединениях трубопроводов, конструкций, сосудов и емкостей, работающих под давлением.

Этот метод основан на измерении давления индикаторной жидкости или газа с помощью манометрических преобразователей (манометров).

В качестве пробного и контрольного веществ при манометрическом методе контроля применяют различные жидкости и газы.

В настоящее время известны два основных способа реализации данного метода: падение давления (для определения величины интегральных утечек); метод дифференциального манометра (для измерения величины локальных утечек).

Пузырьковый метод контроля герметичности сварных соединений проводят для обнаружения мест локальных течей. Он основан на регистрации пузырьков индикаторного газа или жидкости, проникших через сквозные дефекты контролируемого изделия. Различают три основных способа пузырькового метода:

- пневматический (надувом воздуха и обдувом струей сжатого воздуха);
- пневмогидравлический (аквариумный и бароаквариумный);
- вакуумный (с применением вакуум-камер).
- гидравлический метод применяют для обнаружения мест интегральных и локальных течей в сварных соединениях открытых и закрытых конструкций, работающих под давлением.

В качестве пробного и контрольного веществ при этом используют, как правило, рабочую жидкость. Некоторые системы, в которых рабочим веществом является газ, контролируют обычно водой или какой-либо другой жидкостью, не влияющей на коррозионную стойкость контролируемого изделия.

Этот метод основан на проникновении воды или какой-либо другой жидкости в полости сквозных дефектов сварных соединений и регистрации их на противоположной поверхности контролируемого изделия.

Гидравлический метод контроля герметичности сварных соединений в зависимости от предъявляемых к ним требований может быть осуществлен следующими способами:

- гидравлическим с применением люминесцентных индикаторных покрытий;
- падением давления;
- наливом воды под напором;
- наливом воды без напора;
- поливанием струей воды под напором;
- поливанием рассеянной струей воды.

При выборе и использовании методов течеискания необходимо руководствоваться европейскими стандартами EN 1779 и EN 1593.

Контрольные вопросы и задания

1. Каким способом можно оценить степень герметичности?
2. Каким образом измеряется проводимость при определении герметичности?
3. Что называют пробным веществом?
4. Назовите предельный порог чувствительности галогенного метода контроля герметичности.
5. Расскажите о пузырьковом методе контроля герметичности.

9. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ

9.1. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля является ультразвуковая дефектоскопия, т. е. поиск и обнаружение дефектов в материалах и деталях изделий путем локации ультразвуковыми колебаниями.

С помощью современных ультразвуковых (УЗ) дефектоскопов можно не только обнаружить дефекты, но и определить координаты дефекта, измерить его площадь и размеры.

Метод ультразвуковой дефектоскопии был открыт российским ученым Сергеем Яковлевичем Соколовым в 1928 г.

Разрешающая способность акустического исследования определяется длиной звуковой волны. Известно, что при размере препятствий меньше четверти длины волны волна от него практически не отражается. С другой стороны, при повышении частоты колебаний быстро растет их затухание, что ограничивает доступную глубину контроля.

На практике используют колебания частотой 1,0...15 МГц.

Для генерирования УЗ колебаний применяют разнообразные устройства: механические и электромеханические. Для целей УЗ дефектоскопии используют методы излучения, заключающиеся в преобразовании тем или иным способом электрических колебаний в колебания механические.

Наибольшее распространение получил способ, основанный на пьезоэлектрическом эффекте.

В 1880 г. французские ученые братья Кюри заметили, что деформация пластинки кварца вызывает появление на ее гранях электрических зарядов. Если на пластинку кварца нанести электроды и с помощью проводников подсоединить их к чувствительному прибору, то окажется, что при сжатии пластинки возникает электрическое напряжение. При растяжении пластинки также появляется напряжение, причем той же величины, но противоположного знака.

Возникновение электрических зарядов на поверхностях пластинки при ее деформации называют *прямым пьезоэлектрическим эффектом*.

Спустя год, братья Кюри обнаружили и обратное явление. Если к электродам пластинки подвести электрический заряд, то размеры ее увеличатся или уменьшатся в зависимости от полярности приложенного напряжения. При изменении последнего знака кварцевая пластинка то сжимается, то растягивается в такт со знаком приложенного напряжения. Явление изменения размеров пластинки под действием электрического поля называют *обратным пьезоэлектрическим эффектом*.

На основе пьезоэффекта были разработаны и изготовлены многочисленные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП), которые служат не только в качестве излучателя ультразвука, но и в качестве приемника УЗ колебаний, используя обратный пьезоэффект.

Другим принципом возбуждения и регистрации ультразвуковых колебаний является электромагнитоакустический (ЭМА) (рис. 9.1).

При подаче на высокочастотную катушку переменного тока возникающее переменное магнитное поле будет наводить вихревой ток в поверхностном слое. В результате взаимодействия переменного вихревого тока с постоянным или переменным магнитным полем частицы металла будут совершать колебательное движение в плоскости, параллельной плоскости объекта, возбуждая поперечную волну, распространяющуюся перпендикулярно к этой плоскости.

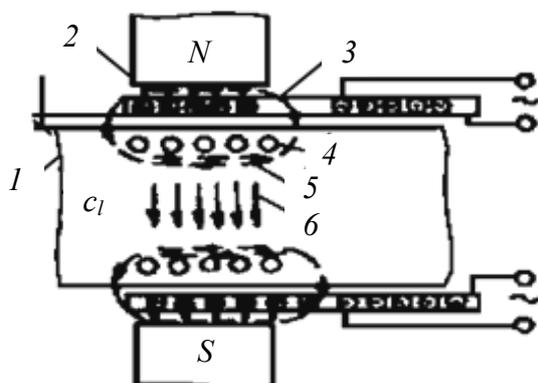


Рис. 9.1. Схема возбуждения ультразвука ЭМА-методом:

1 – контролируемое изделие; 2 – постоянный магнит; 3 – высокочастотная катушка; 4 – контур вихревого тока; 5 – электродинамическая сила, действующая на частицы металла; 6 – возбужденная поперечная волна

Отраженная от неоднородности или противоположной стороны поверхности ультразвуковая волна возвращается к поверхности сканирования, вызывает колебательное движение частиц среды в магнитном поле и приводит к возникновению вихревых токов. Электромагнитное поле этих токов, пересекая высокочастотную катушку, будет наводить в ней переменную ЭДС, которая преобразовывается в электрический сигнал, усиливается и регистрируется индикатором.

Описанный электродинамический эффект позволяет возбуждать как поперечные, так и продольные волны в любых токопроводящих материалах. В ферромагнитных материалах эффективность возбуждения продольных волн хуже, в сравнении с поперечными, вследствие большой магнитной проницаемости этих материалов.

С помощью ЭМА-метода удается возбудить нормальные поперечные волны, что крайне трудно сделать другими способами. Одним из важных достоинств метода является стабильность амплитуды сигнала при наличии неровностей поверхности, окалины или краски. К достоинствам метода следует также отнести возможность контроля при высоких температурах (до 1300 °С), избирательную возможность приема того типа волн, который в данный момент нужен. Последний фактор особенно важен при изучении типа волн от источников акустической эмиссии.

Недостатками надо считать громоздкость преобразователей и резкое уменьшение чувствительности с увеличением зазора. Установлено, что чувствительность метода при $d = 0,1 \dots 0,2$ мм в 2...3 раза ниже по сравнению с пьезоэлектрическим методом возбуждения ультразвуковых колебаний. В настоящее время способ нашел применение при контроле рельс, труб и т. д.

Лазерное возбуждение ультразвуковых колебаний – это достаточно перспективное направление. Суть метода состоит в следующем. При облучении энергией светового потока какого-либо участка тела другие его участки приобретают повышенную температуру не сразу, а лишь спустя некоторое время. Неравномерное распределение температуры приводит к неравномерному тепловому расширению тела, появлению термомеханических напряжений. Эти напряжения изменяются во времени, и в результате возникают акустические волны, излучаемые слоем с изменяющейся температурой. Амплитуда акустического импульса линейно зависит от энергии лазерного импульса.

Акустический импульс может возбудиться также вследствие эффекта светового давления. Однако интенсивность возбуждаемых колебаний от этого воздействия крайне низка, и их трудно зарегистрировать обычной аппаратурой.

Одна из сложных задач при данном способе возбуждения связана с приемом ультразвуковых колебаний, например применение интерферометров. Однако интерферометры имеют ряд недостатков, главные из которых – наличие шумов фотоумножителя, чувствительность к вибрациям, сложность и громоздкость. Чувствительность приведенной схемы контроля значительно ниже по сравнению

с обычным способом контроля. Основные причины, сдерживающие применение лазерного возбуждения, – это нерешенная проблема приема сигналов и отсутствие твердотельных лазеров, отвечающих необходимым требованиям по частоте посылаемых импульсов и их надежности.

Известны и другие бесконтактные способы возбуждения ультразвуковых колебаний: магнитострикционный, радиационный, воздушно-акустический, емкостный, электроискровой, которые не применяются для обнаружения дефектов и поэтому здесь не рассматриваются.

9.2. МЕТОДЫ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Для целей дефектоскопии изделий в промышленности наиболее применяются следующие методы акустического контроля.

Эхометод (рис. 9.2) основан на регистрации эхосигнала, отраженного от дефекта. Кроме преимущества одностороннего доступа он также обладает наибольшей чувствительностью к выявлению внутренних дефектов ($S_{\min} \sim 0,5 \text{ мм}^2$) и высокой точностью определения координат дефектов. К недостаткам метода следует отнести прежде всего низкую помехоустойчивость к наружным отражателям, большую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта. Этим методом контролируют около 90 % всех сварных соединений толщиной более 4 мм.

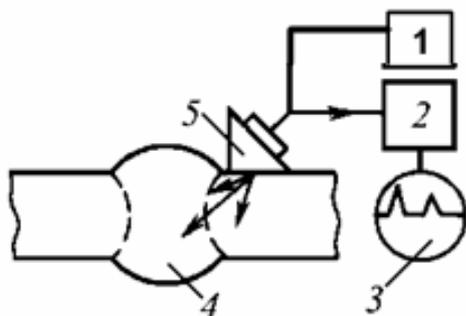


Рис. 9.2. Контроль эхометодом:
1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – индикатор;
4 – объект контроля; 5 – преобразователь

Теневой метод. При теневом методе контроля о наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды ультразвуковых колебаний, прошедших от излучателя к приемнику (рис. 9.3). Чем больше размер дефекта, тем меньше амплитуда прошедшего сигнала. Излучатель и приемник ультразвука располагают при этом соосно на противоположных поверхностях изделия. Теневым методом можно применять только при двустороннем доступе к изделию. При ручном контроле

этим методом контролируются лишь сварные швы ограниченного сечения небольшой толщины.

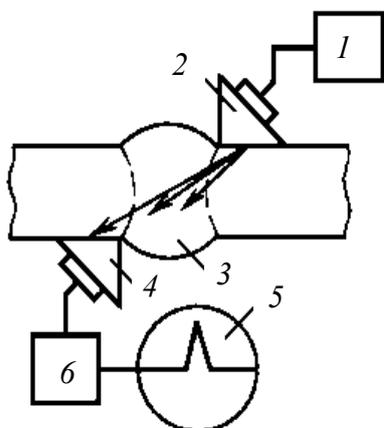


Рис. 9.3. Контроль теньевым методом:
1 – генератор; 2, 4 – ПЭП; 3 – шов; 5 – электронно-лучевая трубка (ЭЛТ); 6 – усилитель

Недостатками метода являются сложность ориентации ПЭП относительно центральных лучей диаграммы направленности (ДН), невозможность точной оценки координат дефектов и более низкая чувствительность (в 10...20 раз) по сравнению с эхометодом.

К преимуществам следует отнести низкую зависимость амплитуды сигнала от ориентации дефекта, высокую помехоустойчивость и отсутствие мертвой зоны. Благодаря первому преимуществу посредством этого метода уверенно обнаруживаются наклонные дефекты, не дающие прямого отражения при эхометодом.

Эхозеркальный метод (рис. 9.4) наиболее достоверен при обнаружении плоскостных вертикально-ориентированных дефектов. Он реализуется при прозвучивании изделия двумя ПЭП, которые перемещаются по поверхности изделия с одной стороны таким образом, чтобы фиксировать одним ПЭП сигнал, излучаемый другим ПЭП и дважды отразившийся от дефекта и противоположной поверхности изделия. Этим методом контролируют изделия с эквидистантными поверхностями, а если их толщина меньше 40 мм, то нужны специальные ПЭП.

Одним из основных преимуществ метода является возможность оценки формы дефектов размером более 3 мм, которые отклонены в вертикальной плоскости не более чем на 10° . При оценке формы дефектов необходимым условием является использование ПЭП одинаковой чувствительности. Метод нашел широкое применение при контроле толстостенных изделий, когда требуется высокая надежность обнаружения вертикально-ориентированных плоскостных дефектов, а также при арбитражных оценках.

Зеркально-теневой метод (рис. 9.5). При этом методе признаком обнаружения дефекта служит ослабление амплитуды сигнала, отраженного от противоположной поверхности (ее называют донной) изделия. Другими преимуществами этого метода, по сравнению с теневым, являются односторонний доступ и более уверенное обнаружение дефектов, расположенных в корне шва. Оба эти метода нашли широкое применение при контроле сварных стыков арматуры.

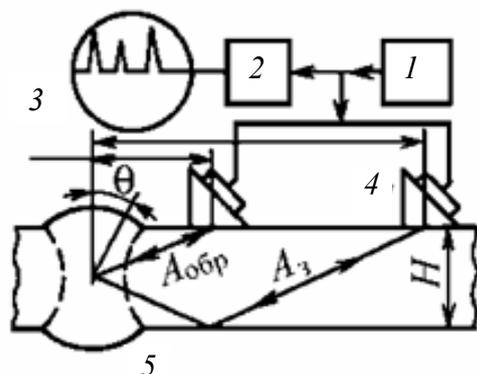


Рис. 9.4. Контроль эхозеркальным методом:

1 – генератор; 2 – усилитель; 3 – ЭЛТ;
4 – ПЭП; 5 – шов; H – толщина изделия;
 $A_{обр}$ – обратно отраженный от дефекта сигнал; A_z – зеркально отраженный сигнал

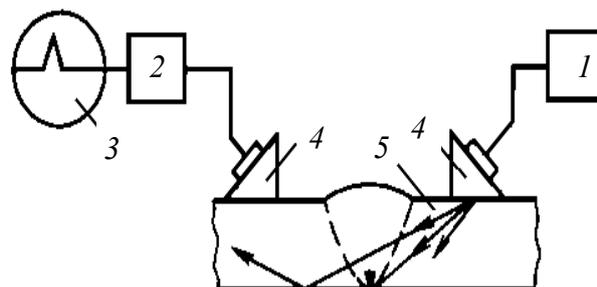


Рис. 9.5. Контроль зеркально-теневым методом. (Обозначения см. на рис. 9.4)

Дельта-метод (рис. 9.6). Здесь используется ультразвуковая энергия, переизлученная дефектом. Падающая на дефект поперечная волна частично отражается зеркально, частично трансформируется в продольную, а частично переизлучает дифрагированную волну. Трансформированная продольная волна распространяется нормально к нижней поверхности, отражается от нее и улавливается прямым ПЭП. Им же будет улавливаться компонента продольной дифрагированной волны, срывающейся с верхнего кончика трещины и распространяющейся вертикально вверх. К недостаткам метода следует отнести необходимость зачистки шва, сложность расшифровки принятых сигналов при контроле соединений толщиной меньше 15 мм, трудности при настройке чувствительности и оценке величины дефектов.

Наиболее достоверные результаты получают, если при калибровке дефектоскопа применяют стандартные образцы предприятия (СОП) с реальными дефектами. Применение СОП с искусственными дефектами, имитирующими трещины, может привести к ложным

результатам. Это связано с тем, что искусственные дефекты имеют с торца сравнительно большую отражающую поверхность, поэтому процессы рассеяния ультразвуковых колебаний от искусственных дефектов могут резко отличаться от реальной картины рассеяния.

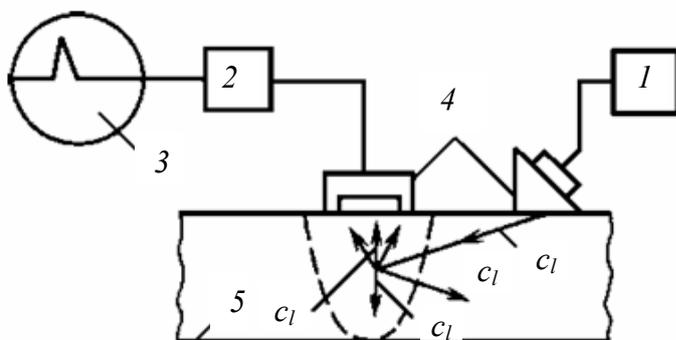


Рис. 9.6. Контроль дельта-методом. (Обозначения см. на рис. 9.4)

Из перечисленных методов контроля, при которых необходимо применять два ПЭП, один из которых выполняет функции излучателя, другой – приемника, схему включения называют *раздельной*. Когда используется один ПЭП, то в этом случае он выполняет функции излучения зондирующих импульсов и приема эхо-сигналов, и такая схема называется *совмещенной*. При эхозеркальном методе ПЭП включены по совмещенной схеме, а также принимают сигналы по раздельной схеме. В этом случае схема называется *раздельно-совмещенной*.

9.3. АППАРАТУРА УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Акустический контроль изделий несколько отличается от других технологических операций контроля. Отличие определяется не только необходимостью работы в цехе в контрольной лаборатории, но и необходимостью работы в поле, на монтаже трубопроводов, в различных погодных условиях.

Это предъявляет особые требования к конструкции дефектоскопа и, в частности, к его массе, габаритным размерам, автономности питания, простоте индикации дефектов, ударостойкости и другим эксплуатационным качествам. В то же время оператор-дефектоскопист должен надежно обнаруживать дефекты и правильно оценивать их величину и степень допустимости для данного изделия. Поэтому к дефектоскопу предъявляется обязательный минимум

функциональных блоков, позволяющий выполнить необходимые операции.

Аппаратура ультразвукового контроля состоит из электронного блока (собственно дефектоскопа), набора пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), содержащих пьезоэлементы для излучения и приема ультразвуковых колебаний, и различных вспомогательных устройств.

Дефектоскоп должен генерировать импульсы УЗ колебаний, принимать отраженные сигналы, преобразовывать эти сигналы к виду, удобному для наблюдения их на экране ЭЛТ и управления дополнительными индикаторами, а также измерять координаты дефектов и определять амплитуды сигналов.

Для достоверного контроля дефектоскоп, как минимум, должен обеспечивать следующее:

- линейную пропорциональность между амплитудами эхосигнала на входе дефектоскопа и индикаторе;
- получение максимальной информации о дефекте, точное измерение амплитуды и временных интервалов между зондирующим импульсом и эхосигналом от дефекта;
- селектирование эхосигналов из любого заданного временного интервала и автоматическую сигнализацию (звуковую, световую) об их наличии;
- выравнивание чувствительности дефектоскопа по всей зоне контроля для компенсации затухания ультразвука в металле.

Дефектоскопы делятся на аналоговые и процессорные. В состав последних входит процессор (компьютер) для управления и цифровой обработки информации, содержащейся в сигнале.

Принцип работы аналогового дефектоскопа поясняется структурной схемой, приведенной на рис. 9.7. К основным узлам функциональной схемы дефектоскопа относятся генератор зондирующих радиоимпульсов (ГЗИ); синхронизатор; усилитель; схема автоматического сигнализатора дефектов; глубиномер, включая генератор стробирующих импульсов; генератор напряжения развертки; ЭЛТ; блок питания.

Генератор синхронизирующих импульсов (ГСИ) вырабатывает последовательность импульсов, которые синхронно запускают ГЗИ, глубиномер и генератор напряжения развертки. В качестве ГСИ чаще всего используют автоколебательный блокинг-генератор, который вырабатывает импульсы отрицательной полярности амплитудой до 400 В, или триггер.

Частота следования синхроимпульсов обычно регулируется в пределах 200...1 000 Гц. Выбор частоты посылок зондирующих импульсов определяется задачами контроля, габаритными размерами и геометрической формой объекта контроля. Малая частота посылок ограничивает скорость контроля, особенно в автоматизированных установках, но в этом случае незначителен уровень шумов, возникающих при объемной реверберации в объекте контроля. При повышении частоты посылок надежность обнаружения дефектов возрастает, яркость свечения экрана ЭЛТ увеличивается. Однако возникает опасность попадания на рабочий участок экрана дефектоскопа многократно отразившихся от стенок объекта контроля сигналов от предыдущего зондирующего импульса. Рекомендуемая частота при УЗ контроле 600...800 Гц.

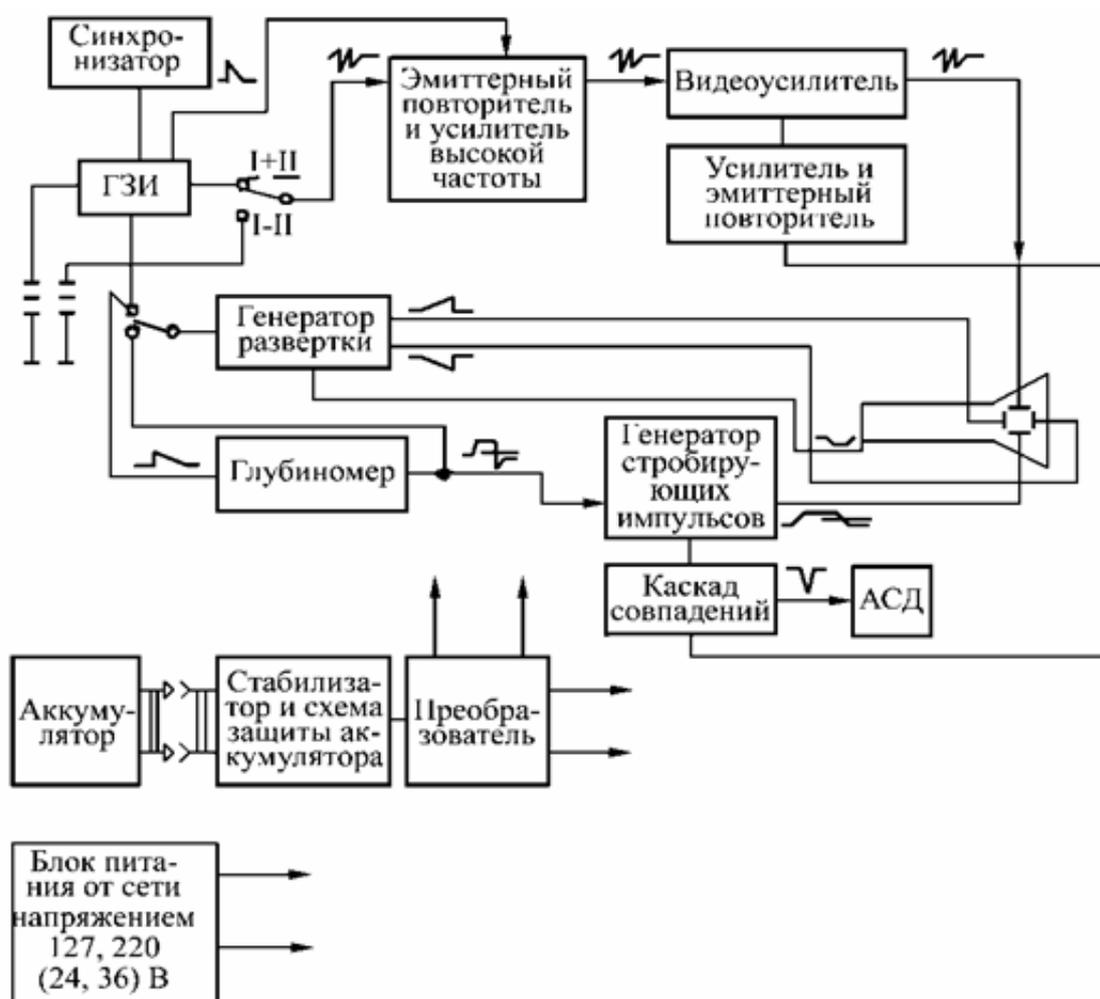


Рис. 9.7. Структурная схема ультразвукового дефектоскопа:
АСД – автоматический сигнализатор дефектов

ГЗИ предназначен для получения короткого импульса высокочастотных электрических колебаний, которые используются для возбуждения пьезопреобразователей. Основными элементами ГЗИ являются колебательный контур, включающий в себя пьезоэлемент, и электронная схема (ключ), обеспечивающая генерацию коротких импульсов.

Частота высокочастотных колебаний, заполняющих импульс, является основной характеристикой дефектоскопа. Она определяется параметрами колебательного контура и выбирается в зависимости от величины затухания ультразвука в контролируемом материале.

Отраженные от дефекта импульсы упругих колебаний попадают на пьезопластину и благодаря прямому пьезоэффекту преобразуются в ней в электрические сигналы. Приемно-усилительный тракт дефектоскопа служит для усиления этих сигналов и содержит предусилитель, измеритель амплитуд сигналов (аттенюатор), усилитель высокой частоты, детектор и видеоусилитель.

Предусилитель обеспечивает электрическое согласование усилительного тракта с приемным преобразователем. Входное сопротивление предусилителя должно быть согласовано с выходным сопротивлением преобразователя. Он содержит ограничитель амплитуды, предохраняющий усилитель от воздействия мощного зондирующего импульса, когда преобразователь включен по совмещенной схеме. При этом сигналы небольшой амплитуды практически не искажаются.

В дефектоскопе предусмотрен специальный переключатель, с помощью которого усилитель может быть непосредственно подключен к ГЗИ (при работе по совмещенной схеме) или отключен от него (при отдельной схеме).

Для измерения отношений сигналов на входе усилителя высокой частоты имеется калиброванный делитель напряжения – аттенюатор, на переднюю панель которого выведены проградуированные регуляторы с диапазоном измерения 80...110 дБ. В последнее время разработаны автоматические измерители амплитуды с цифровым выходом.

В большинстве дефектоскопов аттенюатор проградуирован в отрицательных децибелах, т. е. численная величина отсчета в децибелах пропорциональна вводимому с помощью аттенюатора коэффициенту усиления. При этом максимальному сигналу соответствует минимальный отсчет в децибелах. В ряде приборов отечественного производства по конструктивным причинам аттенюатор проградуирован в положительных децибелах, т. е. большему сигналу отвечает большее значение численного отсчета в децибелах.

Усилители высокой частоты бывают двух типов: узко- и широкополосные. Первые обладают высокой помехоустойчивостью, большим коэффициентом усиления (до 80...90 дБ) и более просты в изготовлении.

Ширину полосы пропускания обычно выбирают равной $0,2f$, что обеспечивает минимальные искажения сигналов. Однако применение узкополосных усилителей увеличивает габаритные размеры дефектоскопа при необходимости работы в широком диапазоне частот. Широкополосные усилители имеют коэффициент усиления на порядок меньше, помехоустойчивость их ниже, но зато и габаритные размеры меньше.

Усиленные высокочастотные сигналы поступают на детектор, на нагрузке которого выделяется однополярная огибающая радиоимпульса. Продетектированные сигналы поступают на видеосуилитель с коэффициентом усиления 20...30 дБ. Видеосигналы подаются на экран ЭЛТ и схему автоматической сигнализации дефектов, предназначенную для фиксации с помощью звукового или светового индикатора сигналов, превышающих заданный пороговый уровень.

В ряде случаев возникает необходимость выявления мелких дефектов на фоне значительных по амплитуде сигналов (от подкладного кольца сварных соединений или донного сигнала при контроле листа продольными волнами).

Для этих целей дефектоскопы снабжают двумя усилителями и соответствующими схемами АСД. Устанавливая различный коэффициент усиления каждого канала, можно избавиться от мешающего влияния больших по амплитуде сигналов.

Для получения дополнительной информации о дефекте, например о фазе отраженного сигнала, в некоторых дефектоскопах предусмотрен выход на трубку недетектированного сигнала.

Для того чтобы подавить на экране реверберационно-шумовые помехи в начале развертки или выровнять чувствительность по глубине, в усилительном тракте имеется схема временной регулировки чувствительности (ВРЧ). Эта схема вырабатывает импульс определенной формы (чаще всего экспоненциальный), который подается на усилитель высокой частоты, запирая его непосредственно после излучения зондирующего импульса и изменяя коэффициент усиления во времени.

Длительность, амплитуда и форма импульса ВРЧ могут регулироваться в зависимости от задач контроля. В целях выравнивания чувствительности к равным отражателям, залегающим на различной

глубине, закон изменения усиления должен быть обратным закону уменьшения амплитуды отраженных сигналов, вызванному затуханием ультразвука и расширением пучка по мере увеличения расстояния.

Генератор напряжения развертки служит для формирования пилообразного напряжения, необходимого для получения линии развертки на экране ЭЛТ, а также импульса подсвета для увеличения яркости изображения во время прямого хода луча.

В некоторых дефектоскопах генератор напряжения развертки может использоваться в режиме «от поверхности» и в режиме «по слоям». В первом случае запуск генератора напряжения развертки проводится одновременно с излучением зондирующего импульса положительным импульсом синхронизатора.

Импульсы пилообразного напряжения положительной и отрицательной полярности с выхода генератора подаются на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. Прямоугольный импульс положительной полярности, вырабатываемый этим генератором, используется в качестве импульса подсвета прямого хода луча. В режиме «по слоям» (задержанная развертка) генератор напряжения развертки запускается импульсом глубиномера.

В дефектоскопах обычно предусмотрены плавная регулировка длительности развертки и ступенчатые диапазоны длительности, которые выбирают в зависимости от толщины изделия.

Глубиномер служит для определения координат дефектов и толщины изделия путем измерения интервала времени между моментами излучения зондирующего импульса и приходом отраженного сигнала. Для выполнения этой функции он содержит калиброванную схему временной задержки синхронизирующего импульса. В момент окончания задержки глубиномер вырабатывает импульс, который используется для запуска генератора стробирующего импульса, позволяющего провести временную селекцию сигналов, отраженных от несплошностей, расположенных в данном слое контролируемого изделия. Стробирующий импульс подается на вертикально отклоняющие пластины ЭЛТ и наблюдается на экране в виде прямоугольного импульса положительной полярности. Передний фронт этого импульса и является меткой глубиномера. Плавный регулятор последнего проградуирован в миллиметрах.

Осциллоскопический индикатор на ЭЛТ служит для визуального наблюдения эхосигналов, определения расстояния до дефектов и измерения амплитуды.

Дефектоскопы общего назначения (рис. 9.8) обычно снабжены дублированной системой питания от сети и автономной от аккумуляторной батареи. Дефектоскоп имеет выход синхронизации для работы других измерительных приборов и может быть синхронизирован внешним источником. Кроме того, предусмотрены выходы с видеосуилителя для аналоговой регистрации результатов контроля на самописце и со схемы АСД для использования в автоматических устройствах с альтернативной (больше – меньше) оценкой качества.



Рис. 9.8. Процессорный дефектоскоп общего назначения

Придаваемые дефектоскопу вспомогательные устройства призваны облегчить труд оператора и повысить достоверность контроля. К ним относятся магнитные держатели, обеспечивающие надежный акустический контакт с изделием; ограничители перемещения в околошовной зоне; приспособления для симметричного одновременного перемещения преобразователей для контроля по схеме «тандем» и др.

Сейчас в основном эксплуатируются аналоговые отечественные дефектоскопы УД2-12, Рельс-6, УДС2-РДМ-3 и зарубежных фирм Krautkramer (ФРГ), Sonotest (Великобритания), Tosomas (США) и др. Эти приборы имеют улучшенные параметры схемы ВРЧ, обеспечивающей максимальную равномерность выравнивания амплитуд сигналов в диапазоне зоны контроля величиной 10...180 мм не ниже 6 дБ; компенсированную схему отсечки шумов; разделение органов настройки и управления на настроечные и оперативные, что повышает эргономические характеристики прибора и достоверность контроля и т. п. Принципиально новые возможности дает применение цифровой техники. Создание мощных процессоров малых размеров обеспечило

активное совершенствование всей дефектоскопической техники, в том числе и ультразвуковых дефектоскопов.

Здесь можно выделить три конструктивных направления. Одно из них – создание дефектоскопов путем сочетания серийных ПЭВМ, в первую очередь типа «ноутбук», с соответствующим электронным блоком, содержащим ГЗИ и усилитель.

Преимуществами таких конструкций являются гибкость управления, широкие возможности по обработке информации с решением нестандартных задач, возможность постоянного совершенствования программного продукта.

К недостаткам следует отнести некомпактность конструкции; необходимость дополнительных операций в клавишном наборе при вызове соответствующей программы, что приводит к временным затратам; невозможность использования в полевых или загрязненных цеховых условиях.

Дефектоскопы, развивающиеся по второму направлению, конструктивно выполнены в виде моноблока, а программное обеспечение, записанное на дискетах или флэш-дисках, заменяется в зависимости от задач контроля Hitachi-2200 (Япония). Преимуществами этих дефектоскопов являются минимальное количество клавиш управления, гибкость в перестройке программ, независимость сложности конструкции и габаритных размеров от числа и сложности решаемых задач.

Безусловно, дефектоскопы этой конструкции имеют большие перспективы в ближайшем будущем, когда в штатные задачи дефектоскописта войдет не только дефектометрия, но и оценка годности и эксплуатационного ресурса изделия (узла), выполняемая на основе автоматического сравнения совокупности информативных признаков дефекта с заложенными в память многопараметровыми нормами качества и соответствующими формулами расчета на прочность для данного конкретного объекта контроля. Кроме того, такие дефектоскопы, имеющие банк программ, могут решать и широкий спектр задач по анализу физико-механических свойств металла.

Недостатками их являются наличие сложных конструктивных элементов и ограниченные возможности для миниатюризации.

Наибольшее развитие получили процессорные дефектоскопы со встроенным процессором и заданным программным обеспечением. Это понятно, поскольку такой подход позволяет максимально уменьшить габаритные размеры прибора, упростить управление и при этом обеспечить высокие прочностные и другие эксплуатационные качества, необходимые при ручном контроле.

Большинство процессорных дефектоскопов работают примерно в одном частотном диапазоне (1,25...10 МГц); имеют плоский дисплей с отображением цифровой и видеоинформации (режим полиэкрана); герметичную клавиатуру прямого доступа; не менее двух стробов АСД, регулируемых по временному положению, длительности и амплитудному уровню; автоматическое измерение амплитуды и временных интервалов; режим задержанной развертки (электронная лупа); встроенную память; меню; текстовый редактор; сопряжение с внешним компьютером через стандартную интерфейсную шину; комбинированное питание: сетевое и от аккумуляторной батареи; противоударный корпус и др.

Применение процессорных дефектоскопов существенно облегчает труд и снижает психофизиологическую нагрузку на оператора, поскольку освобождает его от большинства измерительных операций; улучшает производительность контроля за счет резкого сокращения (в десятки раз) времени на настроечные операции при переходе с одного объекта на другой и, самое главное, повышает достоверность контроля. Последнее определяется новыми возможностями данных дефектоскопов:

- наличием «заморозки» (накопления) сигнала и измерением его максимальных параметров в этом режиме при многократном сканировании дефекта;
- настройкой дефектоскопа в камеральных условиях, что снижает уровень ошибок;
- заданием через меню времени прохождения ультразвуковых колебаний в призме, что повышает точность измерения координат;
- одновременным измерением двух координат дефекта, что необходимо при контроле сложных по геометрии объектов, например угловых швов резки «труба в трубу»;
- запоминанием осциллограммы дефектного участка и его анализом в камеральных условиях с привлечением специалистов более высокого уровня;
- архивированием результатов контроля (осциллограмм и комментариев к ним) на ПЭВМ для дальнейшего мониторинга за поведением дефектов, оставшихся в конструкции.

Автоматизация ультразвукового контроля развивается по пути многофункциональности и роботизации операций сканирования и измерения. Быстродействующие средства контроля создаются на основе применения аналоговых и цифровых методов обработки многомерного сигнала, а также многоканальных акустических систем с одновременным или коммутируемым действием. В координатах амплитуда –

частота – время строятся двух- и трехмерные изображения акустических полей, что дает возможность оценивать тонкую структуру отражающей поверхности.

Механизированное сканирование позволяет облегчить труд оператора, исключить ошибки, связанные с несоблюдением регламента сканирования при поиске дефектов, а в некоторых случаях даже повысить общую производительность контроля (с учетом подготовительно-вспомогательных операций).

Достоверность ультразвуковой дефектоскопии во многом зависит от надежной работы преобразователя – одного из главных элементов в системе НК этого вида. Преобразователи классифицируют по ряду признаков.

По способу акустического контакта твердотельной части преобразователя (протектора, призмы) с контролируемым объектом различают следующие преобразователи:

- контактные, которые прижимают к поверхности изделия предварительно смазанной жидкостью (маслом, глицерином и т. п.); в некоторых случаях слой жидкости заменяют эластичным материалом (эластичным протектором);

- иммерсионные, имеющие слой жидкости между поверхностью и изделием (толщина этого слоя во много раз превышает длину волны); при этом изделие целиком или частично погружают в иммерсионную ванну, используют струю воды и т. д.;

- контактно-иммерсионные, снабженные локальной иммерсионной ванной с эластичной мембраной, контактирующей с изделием непосредственно или через тонкий слой жидкости;

- щелевые (менисковые), между поверхностью которых и изделием создается зазор около длины волны ультразвука; жидкость в зазоре удерживается силами поверхностного натяжения;

- с сухим точечным контактом, имеющим шарообразную поверхность, соприкасающуюся с изделием; площадь соприкосновения 0,01...0,50 мм²;

- бесконтактные преобразователи, возбуждающие акустические колебания в изделии через слой воздуха (воздушно-акустическая связь) с помощью электромагнитно-акустического и оптико-теплового эффектов; эти преобразователи не нашли широкого практического применения, так как их чувствительность в десятки тысяч раз ниже чувствительности других преобразователей. Использование контактных преобразователей с эластичным протектором, а также щелевых, контактно-иммерсионных и бесконтактных позволяет снизить требования к параметрам шероховатости поверхности контролируемого изделия.

В зависимости от способа соединения преобразователей с электрической схемой прибора их можно подразделить:

- на совмещенные, которые соединяются одновременно с генератором и усилителем прибора и служат как для излучения, так и для приема ультразвука;
- отдельные, включающие в себя излучатель, соединенный с генератором прибора, и приемник, соединенный с усилителем;
- отдельно совмещенные, состоящие из излучающего и приемного элементов, конструктивно связанных между собой, но разделенных электрическим и акустическим экранами.

По направлению акустической оси преобразователи классифицируют на прямые, излучающие волны нормально к поверхности изделия, и наклонные.

Раздельно совмещенные преобразователи называют нормальными или наклонными в зависимости от направления их общей акустической оси, соответствующей направлению максимальной чувствительности таких преобразователей. Преобразователи с переменным углом наклона позволяют изменять угол ввода лучей.

По форме акустического поля различают преобразователи:

- обыкновенные с пьезопластиной плоской формы, форма акустического поля которых зависит от формы электродов, поляризации пьезопластины и т. п.;
- фокусирующие, обеспечивающие сужение акустического поля в некоторой области контролируемого объекта;
- широконаправленные (веерные), гарантирующие расхождение акустического поля;
- фазированные решетки (мозаичные преобразователи), представляющие собой плоские преобразователи, состоящие из ряда отдельно управляемых элементов; подавая различные по фазе и амплитуде сигналы на эти элементы, можно изменять направление излучения (угол ввода), добиваться фокусировки или расфокусировки, устранять боковые лепестки.

В зависимости от ширины полосы рабочих частот выделяют узко- и широкополосные преобразователи. К первому типу условно относят преобразователи с шириной полосы пропускания, меньшей одной октавы, а ко второму, если она больше одной октавы (отношение максимальной частоты к минимальной больше 2). Увеличить ширину полосы можно, используя пьезоэлемент переменной толщины, а также включив в конструкцию несколько активных (из пьезоэлектрических материалов) и пассивных (непьезоэлектрических) слоев или применив

толстый пьезоэлемент, излучающий только своей поверхностью ультразвуковые волны (остальная часть пластины служит просто волноводом). В зависимости от способа достижения широкополосности различают преобразователи переменной толщины, многослойные и толстые (апериодические).

В серийно выпускаемых ультразвуковых дефектоскопах для излучения и приема ультразвука чаще всего используют пьезопластины, обладающие пьезоэлектрическим эффектом. Прямой пьезоэффект состоит в появлении электрических зарядов на обкладках пьезопластины в результате ее деформации, обратный заключается в деформации пьезопластины под действием приложенного электрического поля. Обратный пьезоэффект, вызывающий такую деформацию, служит для излучения продольных волн, а прямой, связанный с деформацией по толщине, – для их приема. Для возбуждения и приема поперечных волн используют деформацию сдвига по толщине. В этом случае для передачи деформации от пластины к изделию применяют густые смазочные материалы, так как через жидкотекучие вещества поперечные волны практически не проходят. В качестве такой передающей среды используют нетвердеющие эпоксидные смолы.

Образцом называют средство ультразвукового контроля в виде твердого тела, предназначенное для хранения и воспроизведения значений физических величин (геометрических размеров, скорости звука, затухания), используемых для проверки или настройки параметров дефектоскопа и преобразователей.

Различают стандартные образцы (СО) и стандартные образцы предприятия (СОП).

К СО относят СО-1, СО-2, СО-3, описанные в ГОСТ 14782–86, а также образцы К1, К2, VW, СВУ, широко применяемые в европейской международной практике. Образец СО-1 (рис. 9.9) изготавливается из органического стекла марки ТОСП по ГОСТ 17622–72. Коэффициент затухания продольной ультразвуковой волны в образце при частоте $(2,5 \pm 0,2)$ МГц и температуре (20 ± 5) °С составляет $(0,30 \pm 0,04)$ см⁻¹. Скорость продольных волн в образце $c_1 = (2\ 670 \pm \pm 133)$ м/с. Стандартный образец СО-1 предназначен:

- для определения условной чувствительности (мм) глубины залегания цилиндрического отверстия (ПЭП в положении А);
- оценки точности работы глубиномера (прямой ПЭП в положении Б) для дефектоскопов, у которых глубиномер калиброван в единицах времени. Время прохождения ультразвуком расстояния от поверхности, на которую установлен ПЭП, до пропила 20 мкс;

– оценки лучевой разрешающей способности прямого ПЭП (прямой ПЭП в положении В). Если все три отражателя разрешаются, то в этом случае на экране дефектоскопа наблюдаются три импульса, расстояние между которыми соответствуют по стали: между первым и вторым – 5,5 мм; между вторым и третьим – 11 мм;

– оценки лучевой разрешающей способности наклонного ПЭП (наклонный ПЭП в положении Г). При этом на экране дефектоскопа наблюдаются три импульса от поверхностей цилиндров, расстояния между которыми (импульсами) соответствует по стали: между первым и вторым – 5,5 мм; между вторым и третьим – 11 мм.

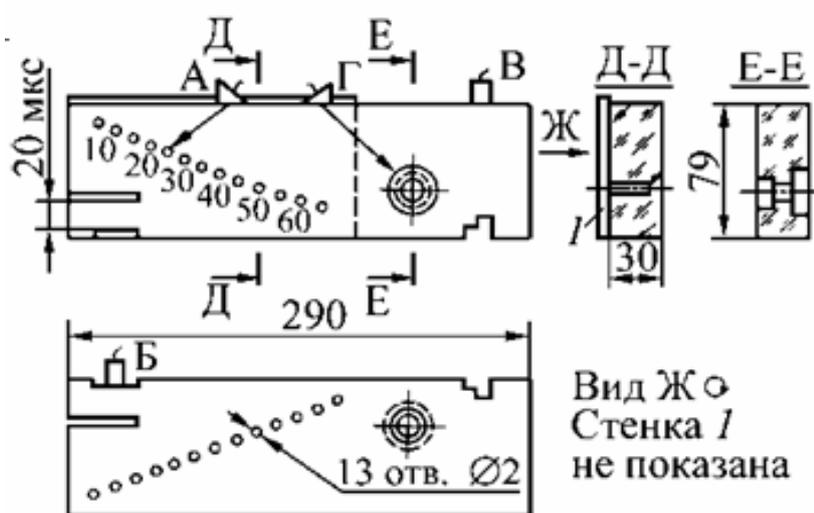


Рис. 9.9. Стандартный образец СО-1

Образец СО-2 (рис. 9.10) изготавливают из стали марки 20 по ГОСТ 1050–88.

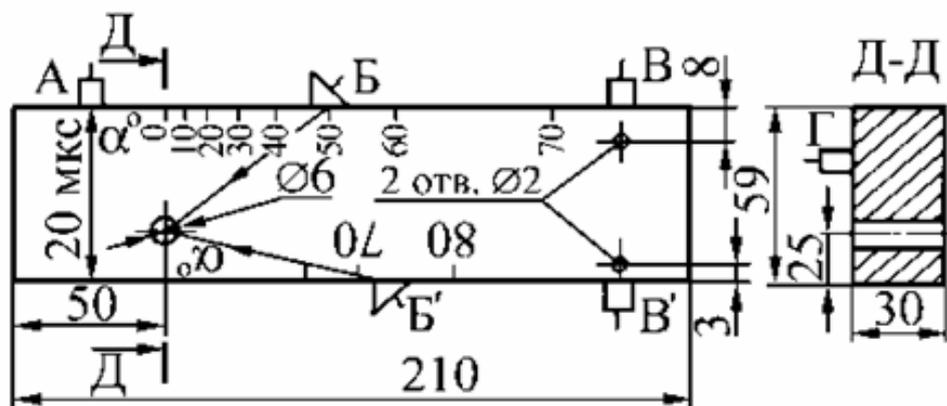


Рис. 9.10. Стандартный образец СО-2

Скорость продольной волны в образце при температуре 20 ± 5 °С равна 5900 ± 59 м/с. Его используют для настройки и проверки параметров при ультразвуковом контроле объектов из малоуглеродистой и низколегированной сталей и определения условной чувствительности при контроле любых материалов. Его применяют:

- для определения погрешности глубиномера (прямой ПЭП в положении А). Время прохождения ультразвуком расстояния от поверхности до дна 20 мкс;
- измерения угла ввода луча (наклонный ПЭП в положении Б или Б'). Перемещая наклонный ПЭП около этих положений, получают максимальный эхо-сигнал. Величину угла ввода считают по риске напротив точки выхода;
- проверки мертвой зоны дефектоскопа с преобразователем (ПЭП в положении В или В');
- определения условной чувствительности в децибелах (ПЭП в положении Б или Б');
- определения предельной чувствительности (с использованием опорного отражателя диаметром 6 мм, ПЭП в положении Б или Б').
- измерения ширины основного лепестка ДН (перемещение наклонного преобразователя около положения Б или Б');
- настройки глубиномера дефектоскопа с прямым ПЭП (ПЭП в положении А или Г);
- настройки чувствительности дефектоскопа с использованием опорного сигнала от отверстия диаметром 6 мм (наклонный ПЭП в положении Б или Б').

При контроле соединений из металлов, отличающихся по акустическим характеристикам от малоуглеродистой и низколегированной сталей, для определения указанных параметров (исключая погрешность глубиномера) следует применять образец СО-2А, изготовленный из соответствующего материала. Конструкции образцов СО-2А и СО-2 одинаковы, однако угловые деления и время пробега продольной волной пути 59 мм должны быть определены для данного материала.

Образец СО-3 (рис. 9.11) изготавливают из стали 20 по ГОСТ 1050–88 или Ст3 по ГОСТ 14637–89. Скорость продольной волны в образце $c_l = 5900 \pm 59$ м/с. Этот образец предназначен:

- для определения точки выхода ультразвукового луча (для этого наклонный ПЭП устанавливают над центральной риской, небольшими перемещениями находят положение, соответствующее максимальному эхосигналу. Точка выхода расположена точно над центральной риской образца);

- изучения условной чувствительности для наклонного ПЭП;
- определения предельной чувствительности для наклонного ПЭП;
- настройки глубиномера для наклонного ПЭП;
- настройки чувствительности для наклонного ПЭП.

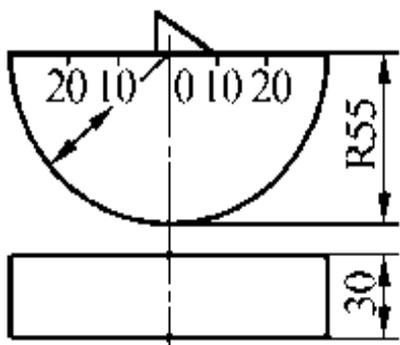


Рис. 9.11. Стандартный образец СО-2

Все указанные операции выполняют в положении наклонного ПЭП, когда его точка выхода совпадает с центром 0 образца. Три последние операции могут осуществляться только для объектов, выполненных из малоуглеродистой и низколегированной сталей.

СОП получили широкое распространение для настройки глубиномера и (или) чувствительности дефектоскопа. СОП воспроизводят акустические свойства материала, конфигурацию, а также форму и шероховатость поверхности контролируемых изделий.

В СОП выполняют искусственные отражатели, расположенные на различных глубинах и имитирующие естественные дефекты изделий. Конкретные типы СОП и области их применения определяются стандартами и другими методическими документами, регламентирующими ультразвуковой контроль.

Технологический процесс ультразвукового (УЗ) контроля включает в себя следующие последовательно выполняемые операции:

- оценку дефектоскопичности (контролепригодности) изделий;
- подготовку изделия к контролю;
- настройку дефектоскопа;
- поиск и обнаружение дефектов;
- измерение координат, размеров дефектов и определение их формы; оценку допустимости дефектов и качества изделия;
- оформление результатов контроля. Операции настройки, поиска, обнаружения, измерения и оценки дефектов обычно объединяют термином «методика контроля». Описание технологического

процесса оформляют в виде инструкции (ОСТ, нормаль), которая является рабочим документом дефектоскописта.

Кроме методических приемов и технологических операций в инструкцию включают общие положения, регламентирующие организацию контроля, его технические возможности, номенклатуру контролируемых изделий, требования к квалификации дефектоскопистов, основные правила поверки аппаратуры, меры безопасности.

Оценка дефектоскопичности изделия. Под дефектоскопичностью понимают совокупность свойств изделия, определяющих возможность контроля с заданной достоверностью.

На дефектоскопичность конструкции влияют толщина и кривизна изделия, наличие доступа для контроля, технология изготовления, структура материала, наличие ложных отражателей и др.

Требования, определяющие пригодность изделия к контролю, следует учитывать уже на стадии конструкторской разработки изделия. Корректировка чертежной документации с целью обеспечения возможности контроля в процессе изготовления или после выпуска изделия приводит к значительным трудовым, временным и материальным затратам.

Подготовка изделия к контролю. Качество поверхности ввода ультразвука должно обеспечивать его максимальное прохождение в изделие по всей площади сканирования. Для этого необходимо освободить контролируемый материал от неплотно прилегающих наслоений, под которыми может образоваться прослойка воздуха, не пропускающая ультразвук, а затем сгладить неровности для обеспечения стабильного акустического контакта. С поверхности удаляют отслаивающуюся окалину и краску, сглаживают забоины, задиры, галтельные переходы, переходы от выпуклости сварного шва к основному металлу, брызги металла, сварочный флюс.

Подготовку поверхности проводят вручную (шабером, металлической щеткой, наждачной шкуркой) или механическим способом (шлифовальной машинкой, на станке). Для изделий, хорошее качество поверхности которых регламентируется условиями поставки и требованиями к их эксплуатации, например вращающихся деталей турбин, вкладышей подшипников, сверленных труб, достаточно ручной подготовки. В большинстве случаев перед контролем сварных соединений, поковок, отливок, штампованных деталей приходится проводить специальную механическую обработку.

Качество подготовленной поверхности оценивают по параметрам шероховатости (ГОСТ 2789–73). Оптимальной считается поверхность с шероховатостью Rz 20...40.

В некоторых случаях для повышения качества контроля эффективны различные способы сглаживания шероховатой поверхности без механической обработки:

- на поверхность накладывают несколько слоев тонкой эластичной пленки (например, рентгеновской) со смазочным материалом между ними;
- грунтуют поверхности самотвердеющими пластмассами;
- применяют специальные преобразователи с протекторами из эластичной резины, которая в процессе сканирования облегчает неровности поверхности изделия.

Эти способы дают важное дополнительное преимущество – меньше изнашивается контактная поверхность преобразователей.

Не менее важен, чем подготовка поверхности, выбор контактной жидкости – смазочного материала, который, будучи правильно подобранным, частично компенсирует потери чувствительности при прохождении ультразвука через грубообработанную поверхность. По экспериментальным данным, при контроле нормальным преобразователем через поверхность с шероховатостью Rz 20...50 замена контактного смазочного материала с кинематической вязкостью $22 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ (трансформаторного масла) на смазочный материал с вязкостью $1\,275 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ (авиационное масло) повышает чувствительность на 4...5 дБ.

Контактная жидкость должна обладать хорошей смачиваемостью по отношению к контролируемому материалу, оптимальной вязкостью и однородностью (образование пузырьков не допускается), быть пожаробезопасной, не должна вызывать коррозии контролируемой детали. Выбор смазочного материала определяется геометрией изделия, его пространственным положением, температурными условиями контроля.

При контактном варианте контроля применяют различные минеральные масла. Они наиболее полно соответствуют перечисленным требованиям при нормальной температуре (5...40 °С). При контроле по поверхностям, близким к плоским, используют жидкие масла (машинное, компрессорное). На изделиях с повышенной кривизной, на вертикальных и наклонных плоскостях, при контроле в потолочном положении рекомендуется применять масла с повышенной вязкостью (солидол, тавот). Однако масла пожароопасны, поэтому все чаще используют водные растворы глицерина и крахмала.

Однородности растворов и отсутствия в них пузырьков воздуха добиваются тщательным перемешиванием и кипячением. Технологична и дешева контактная жидкость, для приготовления которой

достаточно развести в холодной воде размельченный обойный клей типа КМЦ и выдержать раствор в течение 6...8 ч. Нужная консистенция смазочного материала достигается варьированием объемного соотношения клея и воды в пределах от 1 : 3 до 1 : 1. Для обеспечения антикоррозионных свойств водных растворов в них добавляют ингибиторы (сода, нитрит натрия и др.).

При повышении температуры изделия изменяют акустические свойства контактной жидкости, снижается ее акустическая прозрачность. Во время закипания смазочный материал переходит в газообразное состояние, и связь преобразователя с изделием полностью нарушается. В случае низких (минусовых) температур обычные контактные жидкости замерзают и охрупчиваются. Переход жидкости в твердую фазу с порами неизбежно приводит к разрыву акустического контакта.

В настоящее время освоено производство термостабильных паст, которые в сочетании со специальными преобразователями (призма из аэролона) обеспечивают стабильность амплитуды сигнала при температурах $-40...400$ °С. Магнитные жидкости стабильны в диапазоне температур $-40...40$ °С.

Настройка дефектоскопа – первая и, пожалуй, наиболее ответственная методическая операция в технологическом процессе УЗ контроля, поскольку последующие операции оценки эквивалентных размеров и допустимости дефектов заключаются в сравнении измеренных временных и амплитудных характеристик дефектов с параметрами, установленными при настройке.

Настройка сводится к выполнению двух обособленных операций: настройке шкалы расстояний (скорости развертки дефектоскопа) и настройке чувствительности.

Схема поиска (схема контроля) должна обеспечивать:

- максимальный эхосигнал от дефекта заданного минимального размера при контроле методами отражения или максимальное ослабление прошедшего сигнала при контроле способами прохождения;
- получение информации, достаточной для оценки дефектов по действующим нормативам;
- прозвучивание всего объема изделия;
- технологичность контроля, т. е. возможность реализации методики простыми средствами при наименьших затратах.

Выполнение этих требований определяется в первую очередь обоснованным выбором типа и длины (частоты) УЗ волны, направлений прозвучивания, схемы сканирования.

Измерение координат, размеров дефектов и определение их формы. Зафиксированный в процессе поиска отражатель, амплитуда эхосигналов от которого превышает контрольный уровень чувствительности, считают дефектом и измеряют его координаты, эквивалентные и условные размеры, определяют геометрическую форму. Измерение координат и размеров дефектов является обязательной операцией; данные измерений используют при оценке допустимости дефекта. Сведения о форме дефекта в соответствии со сложившейся практикой контроля расценивают как дополнительную информацию, вопрос об использовании которой в качестве критерия отбраковки решают в каждом конкретном случае отдельно (исключение составляет практика отечественного энергомашиностроения, учитывающая форму дефекта при оценке его допустимости согласно ОСТ 108.004.108–80).

Информативность различных измеряемых характеристик дефектов оценивается степенью их корреляции с действительными размерами дефектов. Так, на основании результатов статистического анализа установлено, что для внутренних дефектов условная высота менее информативна, чем эквивалентная площадь.

Оценка допустимости дефектов. Последнюю оценивают путем сравнения измеренных значений характеристик дефектов с их предельными (нормативными) значениями. Полученные в результате контроля данные измерений и вывод о наличии или отсутствии дефектов нормативного размера фиксируют в отчетном протоколе (заключении). Вывод о качестве изделия записывают в альтернативной форме: соответствует или не соответствует техническим условиям. Протокол входит в паспортную документацию изделия, передаваемую заказчику, который организует наблюдение за развитием допустимых (в изготовлении) дефектов посредством системы эксплуатационного контроля.

В заключение отметим, что решение вопроса о допуске к эксплуатации изделия с зафиксированными дефектами не является функцией системы контроля.

Контрольные вопросы и задания

1. Чем отличаются эхометод от теневого метода ультразвукового контроля?
2. Расскажите о эхозеркальном и зеркальнотеневом методе.

3. Что называют аналоговым УЗ дефектоскопом?
4. Какие типы волн используются при УЗ контроле?
5. Какие материалы используют в ПЭП для возбуждения и приема ультразвука?
6. От чего зависит скорость распространения ультразвука в материале?
7. Как измеряют чувствительность УЗ дефектоскопа?
8. Расскажите о классификации ПЭП.
9. Назначение стандартных образцов.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Одной из существенных частей системы менеджмента качества является система контроля качества продукции, выпускаемой предприятием. Раньше основными требованиями к качеству изделий являлись точность и прочность, и производство деталей и узлов изделий с системой контроля ОТК позволяло проводить проверку каждого изделия и успешно производить отбраковку дефектных.

По мере развития производства и все более ужесточающихся требований к условиям эксплуатации изделий, особенно ракетной и авиационной отрасли, растет и число контроля характеристик, и требования к качеству контроля.

Современная система контроля качества продукции ориентирована на обнаружение дефектной продукции и изъятия ее из производственного процесса на всех его этапах. Контроль качества продукции заключается в проверке соответствия показателей ее качества установленным требованиям. При этом на машиностроительных предприятиях при проведении механических и металлографических испытаний после основных технологических операций допускаются очень большие потери, связанные с изготовлением испытательных образцов, доходящие до 15–20 % от партии деталей.

Широкое применение методов неразрушающего контроля и диагностики, не требующих разрушения готовых изделий или приготовления из них испытательных образцов, позволит избежать больших затрат материала и времени на изготовление образцов и проведение испытаний и контроля. Методы неразрушающего контроля могут позволить разработку систем автоматического контроля деталей и узлов при повышении качества и надежности изделий.

Внедрение методов неразрушающего контроля в современное производство изделий авиакосмической отрасли – это залог получения качественной и надежной продукции, залог получения безопасной продукции.

В настоящее время разработка методов неразрушающего контроля, оборудования и аппаратуры неразрушающего контроля представляют особую быстроразвивающую отрасль машиностроения. Современный инженер должен быть знаком с основными принципами и методами неразрушающего контроля.

Авторы надеются, что учебное пособие поможет заложить фундамент, на основе которого студенты будут и дальше совершенствовать свои знания в области методов неразрушающего контроля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клюев, В. В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др.; под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
2. Маслов, Б. Г. Неразрушающий контроль сварных соединений и изделий в машиностроении / Б. Г. Маслов. – М. : Академия, 2008. – 272 с.
3. Шарп, Р. Методы неразрушающих испытаний / пер. с англ. под ред. Р. Шарпа – М. : Мир, 1972. – 494 с.
4. Алешин, Н. П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений / Н. П. Алешин. – М. : Машиностроение, 2006. – 368 с.
5. Ивасев, С. С. Методы неразрушающего контроля : метод. указания / С.С. Ивасев ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2013. – 44 с.
6. Каневский, И. Н. Неразрушающие методы контроля : учеб. пособие / И. Н. Каневский, Е. Р. Сальникова. – Владивосток : Изд-во ДВГТУ. 2007. – 243 с.
7. Кулешов, В. К. Метрология, стандартизация и сертификация неразрушающих методов и средств контроля : учеб. пособие / В. К. Кулешов, И. С. Филатов. – Томск. Изд-во ТПУ, 2008 – 81 с.
8. ГОСТ 23049–84. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Основные параметры и общие технические требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.gost-load.ru. – Загл. с экрана.
9. ГОСТ 23667–85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.gost-load.ru. – Загл. с экрана.
10. Углов, А. Л. Измерение толщины тонких металлических покрытий акустическим методом / А. Л. Углов, А. А. Хлыбов, В. И. Ерофеев, Т.А. Бетина // Контроль. Диагностика. 2013. № 3. – С. 25–29.
11. Никитина, Н. Е. Контроль состояния компрессорных лопаток газотурбинных двигателей ультразвуковым методом / Н. Е. Никитина, Е. А. Мотова // Контроль. Диагностика. 2013. № 3. – С. 38–42.
12. Копылова, Д. С. Измерения толщины субмикронных металлических покрытий на прозрачной подложке лазурным оптико-акустическим методом / Д. С. Копылова, И. М. Пеливанов, Н. Б. Подымова, А. А. Карабутов // Акустический журнал. 2008. Т. 54. № 6. – С. 905–913.

Учебное издание

Ивасев Сергей Сергеевич
Гирн Алексей Васильевич
Раводина Дарья Владимировна

МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Учебное пособие

Редактор *Т. А. Ермолаева*
Оригинал-макет и верстка *О. В. Булатниковой*

Подписано в печать 18.03.2015. Формат 60×84/16. Бумага офисная.
Печать плоская. Усл. печ. л. 6,5. Уч.-изд. л. 7,2. Тираж 50 экз.
Заказ . С 59/15.

Санитарно-эпидемиологическое заключение
№ 24.49.04.953.П.000032.01.03 от 29.01.2003 г.

Редакционно-издательский отдел Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
Отпечатано в отделе копировально-множительной техники
Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та.
660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.