

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

"Воронежский государственный технический университет"

Кафедра автоматизированного оборудования
машиностроительного производства

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ
ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ
для студентов направления подготовки магистров
15.04.01 «Машиностроение»

(профиль «Обеспечение качественно-точностных характеристик
при изготовлении изделий в автоматизированном машиностроительном
производстве») всех форм обучения



Воронеж 2021

УДК 621.01 (07)
ББК 34.5я7

Составитель канд. техн. наук, доц. М. Н. Краснова

Физические принципы определения дефектов при неразрушающем контроле: методические указания к выполнению практических работ для студентов направления подготовки магистров 15.04.01 «Машиностроение» (профиль «Обеспечение качественно-точностных характеристик при изготовлении изделий в автоматизированном машиностроительном производстве») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: М. Н. Краснова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. - 32 с.

Изложены общие вопросы к выполнению практических работ, сформулированы задания и представлен теоретический материал. Выполнение практических работ дает студентам возможность получения навыков при решении типовых инженерных задач с использованием государственных стандартов, учебной и справочной литературы.

Предназначены для студентов направления подготовки магистров 15.04.01 «Машиностроение» (профиль «Обеспечение качественно-точностных характеристик при изготовлении изделий в автоматизированном машиностроительном производстве») всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ. ПР. ФПОДприНК.pdf.

Ил. 12. Табл. 2. Библиогр.: 3 назв.

УДК 621.01(07)
ББК 34.5я7

Рецензент – С. Н. Яценко, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ВВЕДЕНИЕ

В методических указаниях рассмотрены физические явления при неразрушающих методах контроля качества материалов, деталей и изделий машиностроительного производства (выявление дефектов в литых изделиях, сварных и паяных соединениях и т.п.) и функционировании узлов и механизмов, а также в научных.

Практические работы дают возможность ознакомиться с российскими, европейскими и международными стандартами по неразрушающим методам контроля и с руководящими документами и схемами для неразрушающего контроля, что необходимо знать будущему инженерно-техническому работнику современного машиностроительного предприятия.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ

1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ

Капиллярный метод

Поверхностное натяжение и смачивание. Смачивание вызывается взаимным притяжением атомов и молекул жидкости и твердого тела. Известно, что между молекулами жидкости действуют силы взаимного притяжения. Молекулы, находящиеся внутри вещества, испытывают со стороны других молекул в среднем одинаковое действие по всем направлениям. Молекулы же, находящиеся на поверхности, подвергаются неодинаковому притяжению со стороны внутренних слоев жидкости и со стороны, граничащей с поверхностью.

Поведение совокупности молекул определяется условием минимума свободной энергии, т.е. той частью потенциальной энергии, которая изотермически может преобразоваться в работу. Свободная энергия молекул на поверхности жидкости и твердого тела больше, чем внутренняя, когда жидкость или твердое тело находятся в газе или вакууме. В связи с этим они стремятся приобрести форму с минимальной наружной поверхностью. В твердом теле этому препятствует явление упругости формы, а жидкость в невесомости под влиянием этого явления приобретает форму шара. Таким образом, поверхности жидкости и твердого тела стремятся сократиться, вследствие чего возникает *давление поверхностного натяжения*.

Величина поверхностного натяжения определяется работой, необходимой для образования единицы площади поверхности раздела двух находящихся в равновесии фаз. Натяжение рассматривают как результат действия распределенной силы, приложенной к периметру площадки, на которой контактируют рассматриваемые фазы. Направление сил — по касательной к границе раздела и перпендикулярно периметру контактной зоны. Силу, отнесенную к единице длины периметра контактной зоны, называют *силой поверхностного натяжения*. Два равноправных определения поверхностного натяжения соответствуют двум применяемым для его измерения единицам: $\text{Дж/м}^2 = \text{Н/м}$.

Рассмотрим каплю жидкости, лежащую на поверхности твердого тела. Выделим элемент жидкости в точке A , где в контакте друг с другом находятся твердое тело, жидкость и газ. На этот элемент действуют три силы поверхностного натяжения: твердое тело — газ $\sigma_{\text{тг}}$, твердое тело — жидкость $\sigma_{\text{тж}}$ и жидкость — газ $\sigma_{\text{жг}}$. Когда капля находится в состоянии покоя, равнодействующая проекций этих сил на поверхность твердого тела равна нулю: отсюда получаем формулы 1 и 2.

$$\sigma_{\text{жг}} \cos \theta + \sigma_{\text{тж}} - \sigma_{\text{тг}} = 0, \quad (1)$$

$$\cos \theta = \frac{(\sigma_{\text{тг}} - \sigma_{\text{тж}})}{\sigma_{\text{жг}}} . \quad (2)$$

Угол Θ называют краевым углом смачивания. Если $\Theta > 90^\circ$, то жидкость хорошо смачивает твердое тело. Чем меньше угол Θ , тем лучше смачивание. В предельном случае, когда $\Theta = 0$, имеет место полное смачивание твердого тела жидкостью, то есть жидкость растекается по поверхности твердого тела до толщины молекулярного слоя. Если $\Theta > 90^\circ$, т.е. $\Theta > 90^\circ$, то жидкость плохо или полностью не смачивает твердое тело.

Поверхностное натяжение σ характеризует свойства самой жидкости, а $\cos \Theta$ — смачиваемость этой жидкостью поверхности данного твердого тела. Составляющую силы поверхностного натяжения $\sigma \cos \Theta$, «растягивающую» каплю по поверхности КО, называют силой смачивания. Для большинства хорошо смачивающих жидкостей $\cos \Theta$ близок к единице. Например, при взаимодействии воды со сталью он равен 0,685, керосина со сталью — 0,9, этилового спирта со сталью — 0,955.

Сильное влияние на смачивание оказывает чистота поверхности. Например, слой масла на поверхности стали резко ухудшает ее смачиваемость и $\cos \Theta$ становится отрицательным. Он практически полностью исключает возможность применения для контроля пенетранта на водной основе.

Микрорельеф (шероховатость) поверхности КО вызывает увеличение площади смачиваемой поверхности. В этом случае оценку величины краевого угла смачивания $\Theta_{\text{ш}}$ на шероховатой поверхности проводят по формуле 3:

$$\cos \Theta_{\text{ш}} = a \cos \frac{\Theta}{a_0} , \quad (3)$$

где Θ — краевой угол смачивания для гладкой поверхности; a — истинная площадь шероховатой поверхности с учетом неровности ее рельефа, а a_0 — проекция ее на плоскость.

Растворение. Растворение представляет собой поглощение молекул растворяемого вещества молекулами растворителя. В КМК растворение имеет место при подготовке КО к операции контроля и при растворении газа (обычно воздуха), собравшегося у конца тупикового капилляра (дефекта) в пенетранте, что существенно повышает глубину проникновения пенетранта внутрь дефекта.

Сорбция. Это физико-химический процесс, в результате которого происходит поглощение каким-либо веществом газа или растворенного вещества из окружающей среды. Различают *адсорбцию* — поглощение вещества на поверхности раздела фаз и *абсорбцию* — поглощение вещества всем объемом поглотителя. Если сорбция происходит преимущественно в результате физического взаимодействия веществ, то ее называют физической.

В капиллярном методе контроля для проявления используют главным образом явление физической адсорбции жидкости (пенетранта) на поверхности твердого тела (частиц проявителя). Это же явление вызывает осаждение на дефекте контрастных веществ, растворенных в жидкой основе пенетранта.

Диффузия. Проявляется при движении частиц (атомов, молекул) в какой-либо среде. В результате диффузии происходит перенос вещества и выравнивание концентрации частиц в данной среде. В КМК явление диффузии наблюдается при взаимодействии пенетранта с воздухом, сжатым в тупиковом конце капилляра. В данном случае этот процесс неотличим от растворения воздуха в пенетранте.

Важное проявление диффузии при КМК — обнаружение дефектов с помощью проявителей типа быстросохнущих лаков и красок. Частицы пенетранта, заключенного в капил-

ляре, входят в контакт с проявителем (в первый момент жидким, а после затвердевания — твердым), нанесенным на поверхность КО, и диффундируют через тонкую пленку проявителя к противоположной его поверхности. Таким образом, здесь происходит диффузия молекул жидкости сначала через жидкое, а затем через твердое тело. Скорости диффузии атомов или молекул через границу раздела сред контролируются коэффициентом диффузии, который является постоянным для данной пары веществ. Скорость процесса диффузии возрастает с повышением температуры.

Заполнение сквозного капилляра. Рассмотрим известный из физики опыт: капиллярная трубка диаметром $2r$ вертикально погружена одним концом в жидкость. Под действием сил смачивания жидкость в трубке поднимается на высоту l над поверхностью. Силы смачивания действуют на единицу длины окружности мениска. Суммарная их величина

$$F_k = 2\pi r \sigma \cos \theta . \quad (4)$$

Этой силе противодействует вес столба жидкости $\rho g m^2$, где ρ — плотность, а g — ускорение силы тяжести. В состоянии равновесия:

$$2\pi r \sigma \cos \theta = \rho g \pi r^2 l . \quad (5)$$

Тогда высота подъема жидкости в капилляре:

$$l = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r} . \quad (6)$$

Отсюда можно получить величину *капиллярного давления*, которая будет равна отношению действующей на жидкость в капилляре силы F к площади поперечного сечения трубки:

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{r} . \quad (7)$$

Капиллярное давление увеличивается с увеличением смачиваемости и уменьшением размера капилляра.

Для капилляра (трещины) шириной b с плоскопараллельными стенками

$$p_k = \frac{2\sigma \cos \theta}{b} . \quad (8)$$

Явление проникновения жидкости в капилляр имеет место при заполнении дефектов пенетрантом.

Под действием капиллярного давления мениск жидкости движется в направлении открытого конца. Пройденное расстояние l связано с временем t зависимостью:

$$l^2 = \frac{r\sigma \cos \theta}{2\mu} t, \quad (9)$$

$$t = \frac{2\mu}{r\sigma \cos \theta} l^2, \quad (10)$$

где r —коэффициент динамической вязкости жидкости. Время прохождения пенетрантом через сквозную трещину тем меньше, чем меньше вязкость и больше смачивающая способность пенетранта.

Заполнение тупикового капилляра. Процесс заполнения тупикового капилляра пенетрантом отличается от предыдущего случая тем, что газ (воздух), сжатый вблизи тупикового конца дефекта (трещины), ограничивает глубину проникновения пенетранта/

Предельную глубину заполнения трещины пенетрантом рассчитывают, исходя из равенства давлений на пенетрант снаружи и изнутри капилляра. Наружное давление складывается из атмосферного p_a и капиллярного p_k . Для капилляра постоянного сечения:

$$p_a l_0 S = p_b (l_0 - l_1) S, \quad (11)$$

или

$$p_b = \frac{p_a l_0}{l_0 - l_1}, \quad (12)$$

где l_0 — полная глубина капилляра, а S — площадь его поперечного сечения.

Из равенства давлений находим

$$l_1 = \frac{p_k}{p_a + p_k} l_0. \quad (13)$$

Поскольку $p_k \ll p_a$, глубина заполнения капилляра, рассчитанная по формуле (13), составляет не более 10% полной глубины капилляра. Реально предельная глубина заполнения тупикового капилляра оказывается, как правило, больше расчетного значения. Это происходит за счет того, что воздух, сжатый вблизи конца капилляра, частично растворяется в пенетранте, диффундирует в него (*диффузионное заполнение*).

Акустический метод

Данный метод неразрушающего контроля основан на регистрации параметров упругих колебаний, возбуждаемых и (или) возникающих в контролируемом объекте (под объектом контроля подразумеваются материалы, полуфабрикаты и готовые изделия).

При акустическом методе неразрушающего контроля чаще всего применяют звуковые и ультразвуковые частоты, т.е. используют диапазон частот приблизительно от 0,5 кГц до 30 МГц. В случае, когда при контроле используют частоты свыше 20 кГц, используют термин «ультразвуковой» вместо «акустический».

Акустические методы НК применяются для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов (нарушений сплошности, неоднородности структуры, межкристаллитной коррозии, дефектов склейки, пайки, сварки и т. д.) в заготовках и изделиях, изготовленных из

различных материалов. Они позволяют измерять геометрические параметры при одностороннем доступе к изделию, а также физико-механические свойства металлов и металлоизделий без их разрушения.

К акустическим методам относятся методы звукового (импедансный, свободных колебаний и др.) и ультразвукового (эхо-импульсный, резонансный, теневой, эмиссионный, велосиметрический и др.) диапазонов.

По характеру взаимодействия упругих колебаний с контролируемым материалом акустические методы подразделяют на следующие основные методы:

- прошедшего излучения (теневой, зеркально-теневой);
- отраженного излучения (эхо-импульсный);
- резонансный;
- импедансный;
- свободных колебаний;
- акустико-эмиссионный.

По характеру регистрации первичного информативного параметра акустические методы подразделяются на амплитудный, частотный, спектральный.

Применение акустических методов неразрушающего контроля:

- метод прошедшего излучения выявляет глубинные дефекты типа нарушения сплошности, расслоения, непрокляпы, непропаи;
- метод отраженного излучения обнаруживает дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путём прозвучивания изделия и приёма отраженного от дефекта эхо сигнала;
- резонансный метод применяется в основном для измерения толщины изделия (иногда применяют для обнаружения зоны коррозионного поражения, непропаев, расслоений в тонких местах из металлов);
- акустико-эмиссионный метод обнаруживает и регистрирует только развивающиеся трещины или способные к развитию под действием механической нагрузки (квалифицирует дефекты не по размерам, а по степени их опасности во время эксплуатации). Метод имеет высокую чувствительность к росту дефектов - обнаруживает увеличение трещины на (1...10) мкм, причём измерения, как правило, проходят в рабочих условиях при наличии механических и электрических шумов;
- импедансный метод предназначен для контроля клеевых, сварных и паяных соединений, имеющих тонкую обшивку, приклеенную или припаянную к элементам жёсткости. Дефекты клеевых и паяных соединений выявляются только со стороны ввода упругих колебаний;
- метод свободных колебаний применяется для обнаружения глубинных дефектов.

Магнитный метод неразрушающего контроля

Это вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом. При этом происходит регистрация магнитных полей рассеяния над дефектами или магнитных свойств контролируемого объекта.

Магнитные методы неразрушающего контроля применяют для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов в деталях и полуфабрикатах различной формы, изготовленных из ферромагнитных материалов.

В магнитный вид неразрушающего контроля входят методы: магнитопорошковый, феррозондовый, магнитографический и другие.

Магнитопорошковый метод основан на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или суспензии.

Феррозондовый метод контроля основан на измерении напряженности магнитного поля, в том числе и магнитных, полей рассеяния, возникающих в зоне дефектов, феррозондами.

Магнитографический метод неразрушающего контроля заключается в намагничивании зоны контролируемого металла или сварного шва вместе с прижатым к его поверхности эластичным магнитоносителем (магнитной лентой). Фиксации на магнитоносителе возникающих в местах дефектов полей рассеяния и последующим воспроизведением полученной записи. Считывание магнитных отпечатков полей дефектов с магнитной ленты осуществляется в дефектоскопах.

С помощью магнитных методов неразрушающего контроля решают следующие задачи:

- магнитопорошковый метод применяется для выявления поверхностных и под поверхностных (на глубине до 1,5 ... 2 мм) дефектов типа нарушения сплошности материала изделия: трещины, волосовины, расслоения, флокены, непровары стыковых сварных соединений, закатов и т.д. Используется для контроля изделий любых габаритных размеров и форм, если магнитные свойства материала изделия (относительная максимальная магнитная проницаемость не менее 40) позволяют намагничивать его до степени, достаточной для создания поля рассеяния дефекта, способного притянуть частицы ферромагнитного порошка. Магнитно-порошковый метод нашел широкое применение на заводах в промышленности, ремонтных предприятиях и эксплуатирующих подразделениях.

- феррозондовый метод контроля применяется для выявления поверхностных и под поверхностных (глубиной до 10 мм) дефектов типа нарушения сплошности материала: волосовины, трещин, раковин, закатов, плен и т.п., а также для выявления дефектов типа нарушения сплошности сварных соединений и для контроля качества структуры и геометрических размеров изделий, используется для определения степени размагниченности изделий после магнитного контроля. Этот метод можно применять на изделиях любых размеров и форм, если отношение их длины к наибольшему размеру в поперечном направлении и их магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени, достаточной для создания магнитного поля рассеяния дефекта, обнаруживаемого с помощью преобразователя.

- магнитографическим методом контроля выявляют дефекты типа нарушения сплошности материала изделий, в основном для контроля сварных стыковых соединений из ферромагнитных материалов при их толщине от 1 до 18 мм.

Оптический метод неразрушающего контроля

Основан на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом. Они предназначены для обнаружения различных поверхностных дефектов материала деталей, скрытых дефектов агрегатов, контроля закрытых конструкций, труднодоступных мест машин и силовых установок (при наличии каналов для доступа оптических приборов к контролируемым объектам). Регистрация поверхностных дефектов осуществляется с помощью оптических устройств, создающих полное изображение проверяемой зоны. Достоинства этих методов — простота контроля, несложное оборудование и сравнительно небольшая трудоемкость. Поэтому их применяют на различных стадиях изготовления деталей и элементов конструкций, в процессе регламентных работ и осмотров, проводимых при эксплуатации техники, а также при ее ремонте.

Так как контроль с помощью оптических приборов обладает невысокой чувствительностью и достоверностью, то его применяют для поиска достаточно крупных поверхностных трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, открытых раковин, пор, для обнаружения течей, загрязнений, наличия посторонних предметов и т. д.

Контроль проникающими веществами

К этому методу неразрушающего контроля относятся капиллярные методы и методы течеискания.

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных дефектов и регистрации индикаторного рисунка.

При контроле этими методами на очищенную поверхность детали наносят проникающую жидкость, которая заполняет полости поверхностных дефектов. Затем жидкость удаляют, а оставшуюся в полостях дефектов часть обнаруживают путем нанесения проявителя, который адсорбирует жидкость, образуя индикаторный рисунок. Эти методы применяют в цеховых, лабораторных и полевых условиях, при положительных и отрицательных температурах. Они позволяют обнаруживать дефекты производственно-технологического и эксплуатационного происхождения: трещины шлифовочные, термические, усталостные, волосовины, закаты и др. Капиллярные методы могут быть применены для обнаружения дефектов в деталях из металлов и неметаллов простой и сложной формы.

Благодаря высокой чувствительности, простоте контроля и наглядности результатов эти методы применяют не только для обнаружения, но и для подтверждения дефектов, выявленных другими методами дефектоскопии - ультразвуковым, магнитным, вихревых токов и др.

Наиболее распространенными капиллярными методами являются цветной, люминесцентный, люминесцентно-цветной, фильтрующих частиц, радиоактивных жидкостей и др.

Методы течеискания основаны на регистрации индикаторных жидкостей и газов, проникающих в сквозные дефекты контролируемого объекта. Их применяют для контроля герметичности работающих под давлением сварных сосудов, баллонов, трубопроводов гидро-, топливо-, масляных систем силовых установок и т. п. К методам течеискания относятся гидравлическая опрессовка, аммиачно-индикаторный метод, фреоновый, масс-спектрометрический, пузырьковый, с помощью гелиевого и галоидного течеискателей и т. д. Проведение течеискания с помощью радиоактивных веществ позволило значительно увеличить чувствительность метода.

Радиационный метод (рентгенография)

Основан на взаимодействии проникающих излучений с контролируемым объектом. Радиационные методы неразрушающего контроля применяют для контроля качества сварных и паяных швов, литья, качества сборочных работ, состояния закрытых полостей агрегатов и т. д. Проникающие излучения (рентгеновское, потока нейтронов, γ - и β -лучей), проходя через толщу материала детали и взаимодействуя с его атомами, несут различную информацию о внутреннем строении вещества и наличии скрытых дефектов внутри контролируемых объектов.

Наиболее распространенными радиационными методами являются рентгенография, рентгеноскопия и гамма-контроль, которые нашли применение на предприятиях металлургии и машиностроения. В качестве источников проникающих излучений применяют рентгеновские аппараты, бетатроны, линейные ускорители и микротроны, гамма-дефектоскопы и др.

Радиоволновой метод

Основан на регистрации изменения параметров электромагнитных колебаний, взаимодействующих с контролируемым объектом. Их применяют для контроля качества и геометрических размеров изделий из диэлектрических материалов (стеклопластики и пластмассы, резина, термозащитные и теплоизоляционные материалы, фибра), вибраций, толщины металлического листа и т. п. В качестве источников энергии служат магнетроны, клистроны, лампы обратной волны, преобразователи частоты, твердотельные генераторы, диоды Ганна и т. п.

Эти методы еще не нашли должного применения в промышленности, хотя и являются весьма перспективными. Так, с их помощью можно обнаруживать непрочности, расслоения

(площадью от 10 мм² и более), воздушные включения, трещины (от 10 мкм и более), неоднородности по плотности, напряжения, измерять геометрические размеры и т.п.

Тепловой метод

Основан на регистрации тепловых полей, температуры или теплового контраста контролируемого объекта. Тепловой метод неразрушающего контроля применяют для измерения температур, получения информации о тепловом режиме объекта, определения и анализа температурных полей, дефектов типа нарушения сплошности (расслоения, трещины и т.п.), выявления дефектов пайки многослойных соединений из металлов и неметаллов, склейки металл - металл, металл - неметалл и т. п. Контроль осуществляется с помощью термометров, термоиндикаторов, пирометров, инфракрасных микроскопов и радиометров и т.д.

Эти методы также пока применяют ограниченно, в основном в приборостроении для контроля радиоэлектронной аппаратуры. В пленочных проводниках и резисторах выявляют микротрещины, утонения, плохую адгезию, плохой контакт; в микросхемах - плохой контакт, нарушения теплового контакта, короткие замыкания, перегрев; в пленочных конденсаторах - токи утечки; в микродиолах и микротранзисторах - перегрев, неудовлетворительные контакты.

Электрический метод

Основан на регистрации электростатических полей и электрических параметров контролируемого объекта. Электрические методы НК применяют для выявления раковин и других дефектов в отливках, расслоений в металлических листах, различных дефектов в сварных и паяных швах, трещин в металлических изделиях, растрескиваний в эмалевых покрытиях и органическом стекле и т. д. Кроме того, эти методы применяют для сортировки деталей, измерения толщин пленочных покрытий, проверки химического состава и определения степени термообработки металлических изделий. Наиболее распространенными из этих методов являются измерение электрического сопротивления, трибоэлектрический, термоэлектрический и др.

Следует отметить, что методы неразрушающего контроля не являются универсальными. Каждый из них может быть использован наиболее эффективно для обнаружения определенных дефектов. Так, например, с помощью радиационных методов можно выявлять внутренние дефекты в виде пустот и пор в деталях, изготовленных из различных материалов, однако нельзя обнаружить весьма опасные тонкие усталостные трещины. Для этой цели требуется применить другой, чувствительный к поверхностным трещинам метод, например капиллярный, магнитный или вихревых токов. Поэтому для контроля деталей ответственного назначения применяют два или несколько различных методов.

Применение комплексного контроля изделий в условиях производства и эксплуатации позволит повысить качество и надежность техники. Систематическое проведение НК на различных этапах технологического процесса и статистическая обработка результатов этих испытаний позволят устанавливать и устранять причины брака. При этом контроль становится активным методом корректировки технологического процесса.

Вихретоковый метод НК (электромагнитный)

Этот вид неразрушающего контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объект контроля этим полем.

Данный метод применяют для контроля деталей, изготовленных из электропроводящих материалов.

Метод позволяет выявлять нарушения сплошности, в основном трещин, на различных по конфигурации деталях, в том числе имеющих покрытия. На основе метода вихревых токов разработаны приборы для измерения толщины листов и покрытий, диаметра проволоки и прутков. Применяют на заводах и ремонтных предприятиях. В условиях эксплуатации применяют для профилактического контроля лопаток турбин газотурбинных двигателей, сварных и литых узлов элементов конструкций и др.

Особенности присущие вихретоковым методам: многопараметровость, бесконтактный контроль, нечувствительность к изменению влажности, давления и загрязненности газовой среды и поверхности объектов контроля непроводящими веществами.

Вихретоковые методы имеют два основных ограничения:

1. Применяются только для контроля электропроводящих изделий;
2. Имеют малую глубину контроля, связанную с особенностями проникновения электромагнитных волн в объект контроля.

Контрольно-измерительные задачи, решаемые с помощью вихретоковых методов:

- обнаружение трещин, раковин, неметаллических включений и других видов нарушений сплошности (дефектоскопия);
- измерение толщины прутков, стенок труб (при одностороннем доступе), диаметр проволок, а так же толщины лакокрасочных, эмалевых, керамических, гальванических и других покрытий, нанесенных на электропроводящую основу (толщинометрия);
- контроль химического состава, механических свойств, остаточных напряжений (структуроскопия).

1.2. МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

Магнитная дефектоскопия представляет собой комплекс методов неразрушающего контроля, применяемых для обнаружения дефектов в ферромагнитных металлах (железо, никель, кобальт и ряд сплавов на их основе). К дефектам, выявляемым магнитным методом, относят такие дефекты как: трещины, волосовины, неметаллические включения, несплавления, флокены. Выявление дефектов возможно в том случае, если они выходят на поверхность изделия или залегают на малой глубине (не более 2-3 мм).

Магнитные методы основаны на изучении магнитных полей рассеяния вокруг изделий из ферромагнитных материалов после намагничивания (рис. 1). В местах расположения дефектов наблюдается перераспределение магнитных потоков и формирование магнитных полей рассеяния.

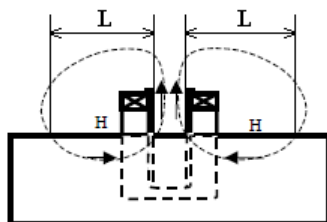


Рис. 1. Магнитные поля рассеяния и силовые линии магнитного поля H (показаны пунктиром), создаваемого намагничивающими устройствами дефектоскопов МД-12ПШ, МД-12ПС, МД-12ПЭ и расположение зон ДН.

L – длина зоны ДН (достаточной намагниченности)

Требуемое направление силовых линий магнитного поля в контролируемой детали обеспечивается полюсным, циркулярным или комбинированным намагничиванием.

Полюсное намагничивание – при котором магнитные силовые линии пересекают поверхность контролируемой детали в продольном или поперечном направлении относительно оси детали. В местах входа и выхода силовых магнитных линий в контролируемой детали образуются магнитные полюса. Примеры полюсного продольного намагничивания показаны на рис. 1.

Циркулярное намагничивание – при котором магнитные силовые линии замыкаются преимущественно в контролируемой детали – рис. 2.

Комбинированное намагничивание – сочетание полюсного и циркулярного намагничивания. Применяется, если требуется получить силовые магнитные линии не строго в продольном или поперечном направлениях относительно оси контролируемой детали.

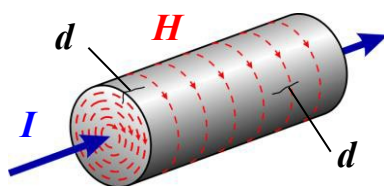


Рис. 2. Циркулярное намагничивание пропусканием тока по контролируемой детали:
I – ток намагничивания; H – магнитные силовые линии (со стрелками); d – выявляемые дефекты

Для выявления и фиксации потоков рассеяния над дефектами используются различные методы.

Наиболее распространенным методом магнитной дефектоскопии является магнитопорошковый метод. При использовании метода магнитопорошковой дефектоскопии (МПД) на намагниченную деталь наносится магнитный порошок или магнитная суспензия, представляющая собой мелкодисперсную взвесь магнитных частиц в жидкости. Частицы ферромагнитного порошка, попавшие в зону действия магнитного поля рассеяния, притягиваются и оседают на поверхности вблизи мест расположения несплошностей. Ширина полосы, по которой происходит оседание магнитного порошка, может значительно превышать реальную ширину дефекта. Вследствие этого даже очень узкие трещины могут фиксироваться по осевшим частицам порошка невооруженным глазом. Регистрация полученных индикаторных рисунков проводится визуально или с помощью устройств обработки изображения.

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля регламентируется следующими отечественными и зарубежными стандартами

Российские стандарты:

- ГОСТ 24450-80 Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения;
- ГОСТ Р 56512-2015 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод;
- ГОСТ 8.283-78 Дефектоскопы электромагнитные. Методы и средства поверки;
- ГОСТ 26697-85 Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихре-токовые. Общие технические требования.

Европейские стандарты:

- EN ISO 9934-1 Неразрушающий контроль. Магнитопорошковый контроль.

Часть 1 Общие принципы;

- EN ISO 9934-2 Неразрушающий контроль. Магнитопорошковый контроль. Часть 2 Материалы для обнаружения;
- EN ISO 12707 Июнь 2000 Неразрушающий контроль. Терминология — Термины, используемые при магнитопорошковом контроле;
- EN ISO 3059 Неразрушающий контроль — Капиллярный и магнитопорошковый контроль. Условия осмотра;
- ISO 3059 Контроль неразрушающий. Контроль методом проникающих жидкостей и методом магнитных частиц. Условия наблюдения;
- ISO 9934 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Часть 3. Оборудование;
- ASTM E 709-01 Стандартное руководство по магнитопорошковой дефектоскопии;
- ASTM E1444-05 Стандартная методика тестирования с помощью магнитопорошковой дефектоскопии.

Магнитопорошковый метод применяется для контроля изделий из ферромагнитных материалов, имеющих относительную магнитную проницаемость не менее 40. Чувствительность контроля данным методом зависит от различных факторов, в том числе от магнитных характеристик исследуемого материала, формы, размеров и шероховатости объекта контроля (макс. Ra 10 / Rz 63), напряженности приложенного поля, местоположения и ориентации дефектов и свойств магнитного порошка. Согласно ГОСТ 21105 устанавливаются 3 условных уровня чувствительности (А, Б, В). Они характеризуются минимальной шириной раскрытия и минимальной протяженностью выявляемого дефекта.

Преимущества магнитопорошкового метода неразрушающего контроля заключаются в его относительно небольшой трудоемкости, высокой производительности и возможности обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов. При помощи этого метода выявляются не только полые несплошности, но и дефекты, заполненные инородным веществом. Магнитопорошковый метод может быть применен не только при изготовлении деталей, но и в ходе их эксплуатации, например, для выявления усталостных трещин.

К недостаткам метода можно отнести сложность определения глубины распространения трещин в металле.

Другими методами магнитной дефектоскопии являются феррозондовый и магнитографический методы.

Феррозондовый метод основан на регистрации магнитных полей феррозондовыми преобразователями, в которых взаимодействуют измеряемое поле и собственное поле возбуждения.

В магнитографическом методе применяется запись магнитных полей на магнитный носитель записи (магнитную ленту) с последующим формированием сигналограммы.

1.3. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Радиационный метод — это метод неразрушающего контроля, который заключается в воздействии на объект ионизирующего излучения с последующим анализом и регистрацией его последствий.

Наиболее широко этот способ исследований используется в дефектоскопии, где его применяют для выявления нарушений однородности и сплошности материала: трещин, утяжин, пор, непроваров, раковин, неметаллических и металлических включений, превышений проплава, прожогов, подрезов, смещения кромок и других. Минимальный размер выявляемых дефектов — 0,1 мм. Также с помощью радиационного метода можно определить внут-

ренную конфигурацию и взаимное расположение объектов контроля, которые не доступны для визуального осмотра в процессе производства, сборки, эксплуатации и ремонта.

Методы радиационного контроля различаются способами детектирования дефектоскопической информации и соответственно делятся:

- радиографические;
- радиоскопические;
- радиометрические.

Изделия просвечиваются с использованием различных видов ионизирующих излучений.

Радиографические методы

Радиографические методы радиационного неразрушающего контроля 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 документным подтверждением получаемых результатов. В зависимости от используемых детекторов различают:

- пленочную радиографию
- 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:

1. рентгенографию;
2. гаммаграфию;
3. ускорительную;
4. нейтронную радиографию.

Каждый из перечисленных методов имеет свою сферу использования. Этими методами можно просвечивать стальные изделия толщиной от 1 до 700 мм.

Также существуют стандарты, устанавливающие единые требования в области радиационных методов:

1. Стандарты, устанавливающие единые требования к терминологии в области радиационных методов контроля и конкретизирующие понятия в этой сфере:

- ГОСТ 20337-74 Приборы рентгеновские. Термины и определения;
- ГОСТ Р 55776-2013 Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения (ИУС 11-2014), действующим с 1.07.2015 г. (вместо ГОСТ 24034-80 Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения);
- ГОСТ 23480-79 Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования;
- ГОСТ 16950-81 Техника радиационно-защитная. Термины и определения;
- ГОСТ 15484-81 Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения;
- Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. РМГ 78-2005 Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения, действует с 01.09.2006 г. Вместо ГОСТ 15484-81 Излучения ионизирующие и их измерения. Термины и определения;

- ГОСТ 17064-71 Узлы и принадлежности для гамма-аппаратов. Термины и определения;

2. Стандарты, регламентирующие сферу использования, общие требования к приборам, аппаратам и образцам, методике проведения контроля, порядку оформления результатов операций и правилам безопасности:

- ГОСТ 27947-88 Контроль неразрушающий. Рентгентелевизионный метод. Общие требования;

- ГОСТ 23480-79 Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования;

- ГОСТ 27451-87 Средства измерений ионизирующих излучений. Общие технические требования;

- ГОСТ 23764-79 Гамма-дефектоскопы. Общие технические условия;

- ГОСТ 25113-86 Аппараты рентгеновские для дефектоскопии. Общие технические условия;

- ГОСТ 20426-82 Контроль неразрушающий. Методы радиационные. Область применения;

3. Стандарты на вновь разрабатываемые и модернизируемые аппараты, предназначенные для рентгенорадиометрических методов контроля. При необходимости регламентирующие методику их поверок:

- ГОСТ 29074-91 Аппаратура контроля радиационной обстановки;

- ГОСТ 29025-91 Дефектоскопы рентгентелевизионные и электрорентгенографические;

- ГОСТ 26114-84 Дефектоскопы на базе ускорителей заряженных частиц. Параметры и требования;

- ГОСТ 17209-89 Средства измерений объемной активности радионуклидов в жидкости;

4. Стандарты, регламентирующие методику контроля качества радиографическими методами:

- Приказ Ростехнадзора № 468-18 от 27.09.2018 Руководство по безопасности «Методические рекомендации о порядке проведения компьютерной радиографии сварных соединений технических устройств, строительных конструкций зданий и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах»;

- ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Сварные соединения. Радиографический метод. Регламентирует требования к рентгенографическому контролю сварных соединений толщиной от 1 до 400 мм;

- ГОСТ 23055-78 Классификация сварных соединений по результатам радиографического контроля. Устанавливает семь классов сварных соединений по допустимым размерам дефектов, выявляемых в ходе радиографического контроля;

- ГОСТ 8.638-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Основные положения (ИУС 12-2014), действует с 01.07.2015 г. Вместо ГОСТ Р 8.594-2002 Метрологическое обеспечение радиационного контроля. Регламентирует требования к состоянию и изменению радиационной обстановки на объекте контроля и контролю за выполнением требований установленных норм;

- ГОСТ 15843-79 Принадлежности для промышленной радиографии. Основные размеры. Регламентирует основные размеры пленок, экранов, кассет, знаков для промышленной радиографии;

- ГОСТ 22091.14-86 Приборы рентгеновские. Методы измерения напряжения рентгеновской трубки. Регламентирует методику контроля за счет определения плотности фотонов, излучаемых рентгеновской трубкой;

- ГОСТ 22091.9-86 Приборы рентгеновские. Измерение размеров эффективного фокусного пятна. Регламентирует методику контроля за счет изменения размеров фокусного пятна, полученного в результате излучения рентгеновской трубки;
- ГОСТ 22091.5-86 Приборы рентгеновские. Методы измерения тока рентгеновской трубки. Регламентирует методику контроля за счет изменения размеров фокусного пятна, полученного изменения тока рентгеновской трубки;
- ГОСТ 8.452-82 Приборы рентгенорадиометрические. Методы и средства поверки. Регламентирует способы и методику проверок рентгенорадиометрических приборов для определения элементного состава веществ.
- ГОСТ ISO 17636-1-2017 «Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 1. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением плёнки»;
- ГОСТ ISO 17636-2-2017 «Неразрушающий контроль сварных соединений. Радиографический контроль. Часть 2. Способы рентгено- и гаммаграфического контроля с применением цифровых детекторов».

Методика и техника контроля

Детали, узлы, изделия поступают на просвечивание после визуального контроля очищенными от масла, грязи, шлака и т.п. На контролируемые узлы изделий разрабатываются технологические карты контроля, которые определяют порядок и технику контроля с использованием ионизирующих излучений.

Перед просвечиванием новых объектов выполняются следующие операции:

1. анализируются конструкции, и определяются участки и схемы просвечивания;
2. выбираются источники излучения, тип рентгенографической пленки, усиливающие экраны;
3. определяются режимы просвечивания (напряжение на рентгеновской трубке и сила тока, тип радиоактивного источника, тип ускорителя и энергия излучения, фокусное расстояние, время просвечивания);
4. проводятся мероприятия по защите людей от воздействия ионизирующего излучения, по обеспечению электро- и пожаробезопасности;
5. заряжаются кассеты;
6. устанавливаются с помощью средств механизации и автоматизации в положение просвечивания источники излучения и контролируемые объекты, а также кассеты, маркировочные знаки, эталоны чувствительности, компенсаторы;
7. защищается кассета от действия рассеянного излучения;
8. подготавливаются к включению рентгеновские аппараты, бетатроны, гамма-дефектоскопы.

Места на деталях и узлах изделий, подлежащие контролю просвечиванием, размечают цветным карандашом или мелком на отдельные участки, соответствующие размеру снимка, и маркируют условными обозначениями. Маркировочные знаки (цифры, буквы, стрелки) изготавливают в соответствии с ГОСТ 15843-70. При повторном контроле на данном участке к маркировке снимка добавляют букву "П".

При проведении просвечивания кассету с пленкой необходимо защитить от постороннего рассеянного и вторичного излучения с задней стороны листовым свинцом толщиной 1-3 мм или другими эквивалентными материалами соответствующей толщины. Заряженные кассеты вместе со свинцовым листом закрепляют на контролируемом объекте с помощью при-

способлений, обеспечивающих плотное прилегание кассет к просвечиваемому участку. При просвечивании плоских деталей в стационарных условиях кассету укладывают на специальный стол, покрытый листовым окрашенным свинцом, либо на свинцовый лист размерами не менее поля облучения.

При просвечивании вне такого стола кассеты вместе со свинцовыми листами плотно прижимают к контролируемому участку. Источник излучения и контролируемый объект с прижатой к нему кассетой во время просвечивания должны находиться в условиях, исключающих их сотрясение и вибрации.

Радиографический контроль необходимо проводить с оптимальным применением средств механизации и автоматизации основных и подготовительных операций, фотообработки рентгеновской пленки, а также с использованием оснастки и приспособлений, повышающих эксплуатационные характеристики основного оборудования.

Выбор или создание устройств, механизмирующих и автоматизирующих операции радиографического контроля, следует проводить с учетом конкретных условий, конструкции контролируемых объектов, технико-экономической эффективности от внедрения этих устройств,

включающей в себя снижение трудоемкости выполнения контрольных операций, улучшение культуры и условий труда, рациональное использование производственных площадей.

В практической деятельности радиографы постоянно сталкиваются с необходимостью решения новых задач по контролю конкретных изделий, когда применение просвечивания в обычной форме их не решает.

Приведем несколько таких примеров:

Полностью пропаянное соединение иногда трудно отличить по радиографическому снимку от полностью непропаянного. В этом случае необходимо обратить внимание на то, как на снимке выглядят галтели. Наличие их изображения на снимке может служить признаком пропаянного соединения.

При радиографическом контроле качества сварных швов алюминиевых сплавов на снимках иногда наблюдаются полосы вдоль сварного соединения, это так называемые ложные дефекты.

Основная причина их появления — *дифракция рентгеновского излучения на зернистой структуре в металле шва*.

Известно, что дефекты, имеющие плоскостной характер, плохо выявляются при просвечивании в направлении, перпендикулярном плоскости раскрытия.

Это относится к непроварам точечной сварки, отсутствию клея в клеевых, клеесварных и клеемеханических соединениях. В этом случае иногда между соединяемыми поверхностями (или в клей) вводят контрастирующие материалы (например, металлическую пудру), хорошо поглощающие излучение, распределение которых отчетливо выявляется по радиографическим снимкам.

Глубину залегания дефектов можно определить, используя принципы стереоскопии. Для этого делают два снимка при смещенных относительно друг друга положениях источника излучения или один снимок, производя просвечивание на одну пленку два раза из разных положений. На поверхностях изделия располагают свинцовые метки.

Глубину залегания дефекта определяют расчетным путем или рассматривая стереоскопическую пару снимков через специальную линзовую стереоскопическую систему.

Специалисты по неразрушающему контролю должны работать в контакте с конструкторами изделий, материаловедцами и технологами. Обязательными являются:

- проверка надежности применяемых приемов по результатам металлографического анализа;
- оценка влияния вносимых изменений в технологию изготовления (например, введение в соединение контрастирующих материалов) на прочностные свойства изделий.

Надежность радиографического контроля повышается при привлечении специалистов по неразрушающему контролю к анализу дефектоскопической технологичности вновь создаваемых конструкций на ранних стадиях проектирования.

Схемы просвечивания объектов контроля рис.3 – 8.

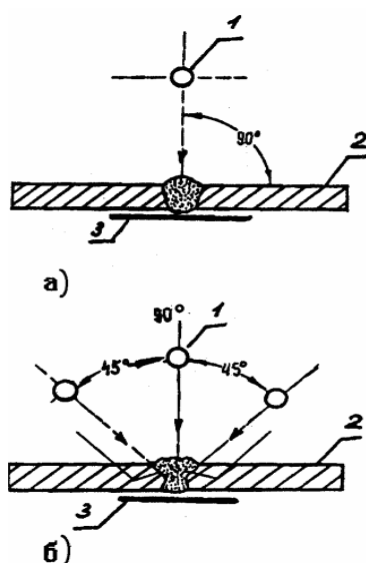


Рис. 3. Схемы просвечивания объекта контроля (ОК) со сварным швом: а — без скоса кромок, б — с кромками Х-образной разделки;
1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — пленка

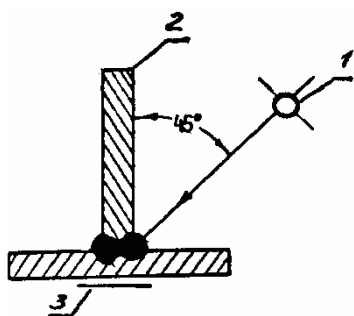


Рис.4. Схемы просвечивания тавровых

ОК 1 - источник излучения; 2 - ОК; 3 - пленка

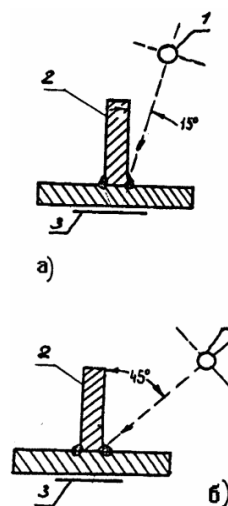


Рис. 5. Схема просвечивания таврового ОК с неполным проплавлением угла между стенками: с полным проплавлением элементов соединения:

а — правильная; б — неправильная;

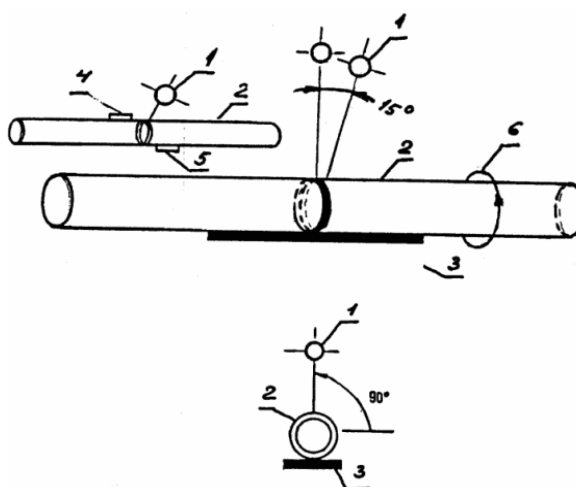
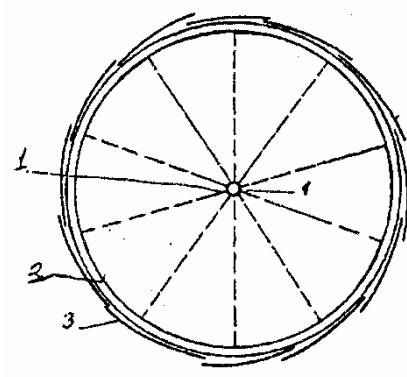


Рис. 6. Схема просветки кольцевого стыкового сварного соединения с внешним диаметром 32...64мм через две стенки:

1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — пленка; 4 — пластинчатый эталон чувствительности с толщиной 2 % от удвоенной толщины стенки; 5 — пластинчатый эталон чувствительности с толщиной 2 % от толщины одной стенки; 6 — участки (экспозиции) при контроле (не менее 6)



1 — источник излучения; 2 — ОК; 3 — пленки

Рис. 7. Схема просвечивания труб большого диаметра

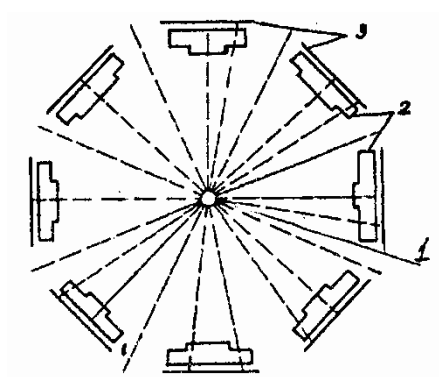


Рис. 8. Схема просвечивания одинаковых мелких ОК

Примеры рентгено (гамма) дефектоскопов

- *регистратор гамма-изображений* (Разработчик РНЦ "Курчатовский институт")

Этот прибор предназначен для получения гамма-изображений (изображений в гамма-лучах), по которым можно с безопасного расстояния обнаруживать радиоактивные источники и определять распределения радиоактивности.

Схема прибора для получения гамма-изображений (Рис. 9) состоит из коллиматора, формирующего изображение; сцинтиллятора, излучающего свет при поглощении гамма-квантов; усилителя света на основе МКП и цифровой ПЗС камеры. Кадры дефектных областей могут сохраняться для последующего анализа.

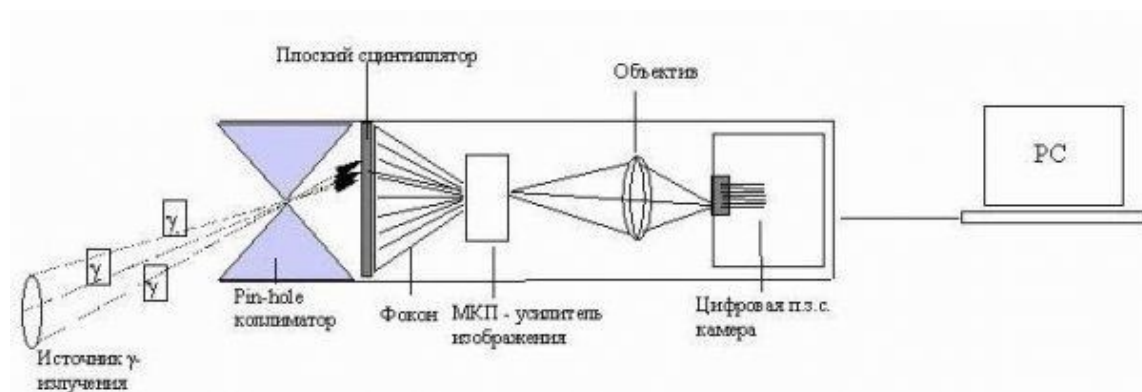


Рис. 9. Схема прибора для получения гамма-изображений

- *рентгено-дефектоскопия* (Разработчик РНЦ "Курчатовский институт")

Отделом разработки детектирующих систем создан и внедрен в производство рентгенодиагностический комплекс контроля сварных швов и толщины стенок стальных труб. Применение цифровой рентгеновской телевизионной системы позволяет осуществлять контроль шва длиной около 4 метров всего за 8 минут и контроль толщины стенки труб со скоростью до 3 м/мин. По традиционной технологии пленочной радиографии на эти процессы уходит несколько часов.

Основные возможности рентгеновского контроля:

- возможность обнаружить такие дефекты, которые невозможно выявить любым другим методом - например, непропаев, раковин и других;
- возможность точной локализации обнаруженных дефектов, что дает возможность быстрого ремонта;
- возможность оценки величины выпуклости и вогнутости валиков усиления сварного шва.

Проведение дефектоскопии с применением рентгеновского просвечивания металлов является наиболее достоверным способом контроля сварных соединений и основного металла, позволяющим наглядно определять вид и характер выявленных дефектов, достаточно точно определять их месторасположение, а также архивировать результаты контроля. Кроме того, современные аппаратно-программные комплексы позволяют осуществлять автоматизированную расшифровку рентгеновских снимков.

К существенным недостаткам радиографического контроля следует отнести его рентгеновское излучение, являющееся ионизирующим, которое оказывает воздействие на живые организмы, и может являться причиной лучевой болезни и рака. По этой причине при работе с рентгеновским излучением необходимо соблюдать меры защиты, а организации, осуществляющие рентгенографический контроль в обязательном порядке должны иметь Лицензию на проведение работ, связанных с использованием Источников ионизирующего излучения (ИИИ) и Санитарно-Эпидемиологическое Заключение (СЭЗ) выданные Федеральной службой Роспотребнадзора.

Рентгенографический контроль наряду с другими физическими методами (ультразвуковой контроль, капиллярный контроль, магнитно-порошковый контроль, визуально-измерительный контроль) является надежным и высокоэффективным средством для выявления возможных дефектов.

Некоторые производители в целях экономии или некомпетентности игнорируют проведение неразрушающего контроля продукции или вспоминают о нём только на последней стадии - уже непосредственно перед сдачей объекта (а это приводит к дополнительной потере времени и непредусмотренным расходам), когда контроль бывает технически неосуществим. Подобное отношение к контролю качества чаще всего приводит к аварийным ситуациям в процессе эксплуатации и способно привести даже к техногенным катастрофам.

1.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Акустическими методами называют методы контроля, основанные на применении упругих колебаний и волн в контролируемом объекте. Одна из основных причин широкого распространения акустических методов заключается в том, что свойства материалов, определяющие возбуждение и распространение механических колебаний, тесно связаны с прочностными характеристиками. В связи с этим основными задачами методов акустического неразрушающего контроля являются:

- • выявление дефектов типа нарушения сплошности;
- • оценка геометрических параметров изделий;
- • оценка физико-химических параметров изделий или механических свойств материала.

Ультразвуковой. В данном случае, задействуются волны ультразвукового диапазона, для возбуждения и приёма которых требуется наличие пьезопреобразователя. Для лучшей передачи волн и устранения воздушных зазоров, влияющих на точность показаний прибора, при проведении измерений необходимо использовать специальную жидкость, в роли которой зачастую выступает глицерин.

Частотный. Волны звукового диапазона возбуждаются не только посредством пьезокристаллов, но и особых ударных устройств, а для их приёма требуются микрофоны.

Помимо этого, все методы акустического контроля классифицируются по характеру взаимодействия с исследуемым объектом. Таким образом, различают пассивные методы (вибрационный и шумовибрационный), а также активные, перечень которых гораздо шире:

1. Эхолокация. Пьезопреобразователь посылает импульс, который отражается либо от внутренней стенки объекта, либо от дефекта. Данная методика особенно популярна в сферах, где требуется проведение исследований качества сварных швов и заготовок из различных металлов, включая всевозможные сосуды и трубы.

2. Спектральный. Метод подразумевает использование специального оборудования, благодаря которому можно проанализировать спектр частот собственных колебаний материала, возникающих после того, как по изделию был нанесён удар определённой силы.

3. Эмиссионный. Данный метод подразумевает использование упругих ультразвуковых волн, которые появляются по причине изменения структуры материала. Чтобы иметь возможность воспользоваться такой методикой, нужно задействовать сразу несколько приёмников и преобразователей ультразвуковой волны. Координаты дефекта определяются, исходя из времени поступления сигнала от источника к каждому приёмнику.

4. Резонансный. Толщина объекта определяется по резонансным частотам, а при наличии дефекта, показания прибора будут ниже номинального значения.

5. Теневой. Чтобы провести исследования с помощью такого метода, нужно обеспечить двусторонний доступ к объекту, ввиду того, что сигнал отправляется с одного пьезопреобразователя, а принимается другим. То есть, методика пригодна лишь для поверхностной (неточной) оценки качества изделия.

6. Импедансный. Благодаря использованию такого метода, можно без труда определить твёрдость и плотность материала, а также наличие или отсутствие дефектов внутри него. Если дефект есть, то амплитуда колебаний генератора ультразвуковых волн неизбежно увеличивается.

7. Зеркально-теневой. Этот способ имеет свои преимущества: ему безразлично качество поверхности и не требуется обеспечение двустороннего доступа. Но и недостатков он не лишён: с его помощью невозможно определить точные координаты дефекта, зато он явно укажет на его наличие. Самостоятельно подобный метод исследований применяется крайне редко, а только в комплексе с другим, более точным.

Работа всех методов акустического контроля основывается на звуковых и ультразвуковых колебаниях, с фиксацией их параметров, и благодаря им, можно без лишних усилий выявить дефекты любых размеров на любых поверхностях, в том числе, и скрытых. Ведь ультразвуковые волны имеют свойство проходить сквозь материал и, пройдя требуемое расстояние, возвращаться. Как только одна волна возвращается, сразу же посылается другая, и такие действия могут совершаться до полумиллиона раз в секунду. Эту величину принято называть частотой волн.

Классификационная система

В соответствии с ГОСТ 18353—79 все методы НК классифицируются по следующим признакам:

1) по характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом. Под характером взаимодействия физического поля или вещества с ОК подразумевается непосредственное взаимодействие поля или вещества с контролируемым объектом, но не с проникающим веществом;

2) по первичному информативному параметру. Под первичным информативным параметром подразумевается одна из основных характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с ОК;

3) по способу получения первичной информации. Под первичной информацией подразумевается совокупность характеристик физического поля, регистрируемая после взаимодействия этого поля с ОК.

На рис. 10 приведена классификационная схема акустических методов НК по ГОСТ 18353—79. Согласно ГОСТ 23829—79 акустические методы подразделяются на две большие группы. Одна из них использует излучение и прием акустических колебаний и волн (*активные методы*), вторая — только прием колебаний и волн (*пассивные методы*). Колебания в последнем случае возбуждаются под действием процессов, происходящих в самом ОК. В каждой из этих групп можно выделить методы, основанные на возникновении в ОК бегущих и стоячих волн или колебаний, (рис. 11).



Рис. 10. Классификация акустических методов контроля по ГОСТ 18353-79

Активные акустические методы, в которых применяют бегущие волны, делят на подгруппы: методы, использующие прохождение, отражение волн, и комбинированные методы, в которых применяют как отражение, так и прохождение.

К пассивным методам относят акустико-эмиссионный метод, в котором используют бегущие волны. Явление акустической эмиссии (от лат. *emissio* — испускание, излучение) состоит в излучении упругих волн материалом ОК в результате внутренней динамической локальной перестройки его структуры.



Рис. 11. Классификация акустических методов контроля и диагностики по ГОСТ 23829-79

К пассивным методам относят также вибрационно-диагностический и шумодиагностический. В первом из них анализируют параметры вибрации какой-либо отдельной детали или узла с помощью приемников контактного типа. Во втором изучают спектр шумов работающего механизма в целом на слух или с помощью микрофонных и других приемников и приборов-анализаторов спектра.

При использовании методов колебаний возбуждают свободные или вынужденные колебания либо ОК в целом (интегральные методы), либо его части (локальные методы). Свободные колебания возбуждают путем кратковременного внешнего воздействия на ОК, вынужденные колебания предполагают постоянную связь колеблющегося ОК с возбуждающим генератором, частоту которого изменяют. Измеряемыми величинами служат частоты свободных колебаний либо резонансов вынужденных колебаний.

Методы прохождения

Методы прохождения основаны на возбуждении в изделии упругой волны и анализе свойств волн, прошедших через ОК. Методы прохождения предполагают наличие двух преобразователей — излучающего и приемного, расположенных по разные стороны от ОК или контролируемого его участка. В некоторых случаях преобразователи размещают с одной стороны от ОК на определенном расстоянии друг от друга. Информацию получают, измеряя параметры прошедшего от излучателя к приемнику сквозного сигнала. К этой подгруппе относят следующие методы: амплитудный теневой, временной теневой и велосиметрический.

Методы отражения

Методы отражения используют сигналы, отраженные от дефектов. Информативными параметрами могут быть амплитуда волны (содержит информацию о размере дефекта), время прихода импульса (характеризует глубину залегания дефекта), фаза колебаний. Методы отражения включают эхометод, зеркальный эхометод, дельта-метод, реверберационный метод.

Комбинированные методы

В комбинированных методах используются принципы как прохождения, так и отражения акустических волн. К числу комбинированных методов относятся: зеркально-теневой, эхотеневой и эхосквозной методы. Благодаря совместному применению методов отражения и прохождения достигается повышение надежности контроля.

Способы осуществления акустического контакта

Акустический контакт — способ передачи акустического сигнала из объекта контроля в преобразователь и наоборот. Акустические волны сильно отражаются от тонких воздушных зазоров. Поэтому для передачи волн от преобразователя к объекту такие промежутки часто заполняются жидкостью.

Бесконтактный способ. Акустические колебания в ОК возбуждаются через слой воздуха либо создаются в ОК с помощью действия электромагнитных, оптических, тепловых и других явлений. Данный метод контакта имеет пониженную чувствительность контроля, но его применение оправдано в следующих случаях:

- объект контроля имеет грубую поверхность;
- высокие скорости контроля;
- контроль ведется при высоких температурах;
- поверхность контролируемого объекта загрязнена.

Щелевой (менисковый) способ. Иммерсионная жидкость удерживается в зазоре между преобразователем и поверхностью объекта контроля силами поверхностного натяжения (рис. 12). В щелевом способе длина волны соизмерима с толщиной иммерсионного слоя $h \ll X$.

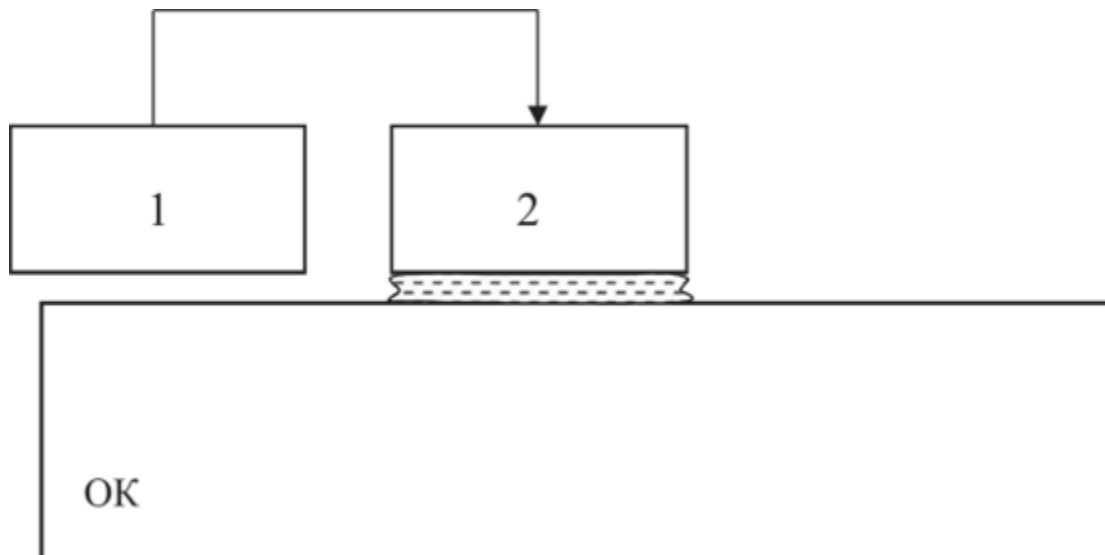


Рис. 12. Щелевой акустический контакт

Контактный метод. Для обеспечения акустического контакта преобразователь должен быть плотно прижат к поверхности объекта контроля, смазанного жидкостью (например,

трансформаторным маслом) для сглаживания шероховатости. Толщина слоя контактной жидкости существенно меньше длины волны УЗК: h .

Иммерсионный метод. Объект контроля погружается в иммерсионную жидкость целиком. Также возможно применение локальной жидкостной ванны для части ОК. В этом случае толщина слоя жидкости — расстояние между преобразователем и поверхностью объекта контроля — существенно больше длины волны. *Иммерсионный способ используется в тех методах контроля, для которых особенно важна стабильность акустического контакта (таких как амплитудный теневой, эхосквозной методы).*

Контактные среды должны соответствовать следующим требованиям:

иметь малое поглощение энергии акустических колебаний; обеспечивать хорошую смачиваемость; быть экологически безвредными;

- *не должны вызывать коррозию изделия;*

- *свойства контактной среды должны сохраняться во всем рабочем интервале температур;*

- *контактная среда не должна быть дорогостоящей, что особенно важно для иммерсионного способа контакта.*

Преимущества и недостатки АК

Основные преимущества АК:

- возможность контроля изделий из самых различных металлических и неметаллических материалов независимо от их электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости;

- возможность выявления как поверхностных, так и внутренних дефектов;

- безопасность для исполнителей и окружающих;

- сравнительно небольшие затраты на контроль;

- мобильность и адаптивность;

- относительная легкость автоматизации.

Основные недостатки акустических методов НК:

- трудность или невозможность контроля изделий из неоднородных крупнозернистых материалов (нетермообработанных литых металлов, например, аустенитных сталей, некоторых типов чугунов);

- требование ровной, гладкой поверхности изделия;

- трудность контроля изделий малых размеров или сложной формы.

Из рассмотренных методов АК наибольшее практическое применение находит эхометод. Около 90 % объектов, контролируемых акустическими методами, проверяют эхометодом. С его помощью решают задачи дефектоскопии литья, сварных соединений, многих неметаллических материалов. Эхометод используют также для измерения геометрических параметров ОК и оценки физико-механических свойств материалов.

Другие методы АК применяют для решения задач контроля, в котором использование эхометода невозможно, либо в качестве дополнительных к эхометоду для более полного обнаружения и исследования дефектов. В табл. 1 приведена краткая сравнительная характеристика методов АК.

Акустический метод неразрушающего контроля имеет как достоинства, так и недостатки. Главное преимущество чётко обозначено в слове «неразрушающий», ибо для диагностики предмета исследований не требуется ни его демонтаж, ни даже частичное разрушение, ни остановка поточных линий, что очень важно в условиях промышленного производства. Более того, современные приборы, применяемые для исследований, отличаются компактностью и мобильностью, а это значит, что диагностике подлежат любые изделия, в том числе, и те, что будут в дальнейшем эксплуатироваться.

Акустические дефектоскопы могут проверить объект целиком и полностью или частично. То есть, полное исследование не всегда уместно, а возможность «фрагментации»

позволит держать под контролем особо уязвимые места объекта, а также участки, подверженные наибольшему износу. Более того, при необходимости можно организовать непрерывный контроль, который просто необходим на АЭС и иных стратегических и потенциально опасных объектах. Но и самое главное не в этом. Важно, что предмет исследования, в ходе манипуляций, с ним производимых, не теряет своих свойств, а это значит, что дорогостоящее оборудование или продукция полностью сохранит свои характеристики.

Таблица 1

Краткая сравнительная характеристика методов АК

Метод	Преимущества метода	Особенность применения
Эхометод	Односторонний доступ к изде- лию	Контроль литья, сварных соединений, неме- таллических материалов, определение гео- метрических размеров и физико- механических свойств
Зеркально- теневой	Выявление слабо отражающих дефектов перпендикулярно поверхности контроля	Контроль литья, металла
Эхозеркальный	Выявление более мелких де- фектов, чем зеркально- теневым методом	Контроль литья, металла
Дельта-метод	Получение дополнительной информации о дефектах свар- ных соединений, определение геометрии дефекта	Контроль сварных соединений
Эхотеневой	Обнаружение слабо отража- ющих дефектов	Автоматизированный контроль сварных со- единений
Теневой, эхосквозной	Возможность контроля изде- лий с большим уровнем ре- верберационных помех	Автоматизированный контроль сварных со- единений, тонких металлических изделий простой формы (листовой прокат), контроль физико-механических свойств неметалличе- ских материалов

Преимущества:

- 1 Высокую скорость проведения исследований.
- 2 Незамедлительную выдачу результатов.
- 3 Возможность использования на самых разных материалах.
- 4 Возможность проведения исследования только с одной стороны объекта.

Недостатки:

1. Для корректной работы прибора необходимо обеспечить хороший контакт поверх-
ности с пьезопреобразователем.
2. Если дефекты расположены параллельно ультразвуковым лучам, то есть риск их не
обнаружить и вовсе.
3. Чтобы верно интерпретировать полученные данные, отображённые на дисплее,
нужны соответствующие навыки.
4. Всякому прибору требуется регулярная настройка и поверка.

Выбор конкретного метода неразрушающего контроля в той или иной ситуации осу-
ществляется экспертом организации, выполняющей работы по НК. Он принимает во внима-
ние следующие факторы:

- вид анализируемого объекта;

- материал, из которого он изготовлен;
- размер изделия;
- область его применения;
- другие условия.

Акустический неразрушающий контроль является одним из наиболее популярных методов проверок. Это связано с тем, что он может быть использован для самых различных материалов, включая те, которые не поддаются диагностике другими методами. Кроме того, широкий спектр вариаций данного метода позволяет применять его для объектов, обладающих специфическими свойствами. Например, это могут быть материалы, создающие помехи, изделия, имеющие микроскопические трещины и другие объекты.

1.5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОНИКАЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Капиллярная дефектоскопия – является одним из основных методов неразрушающего контроля и предназначена для обнаружения поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности (для протяженных дефектов типа несплошностей, трещин) и их ориентации на поверхности. Капиллярный метод неразрушающего контроля (ГОСТ 18442-80) основан на капиллярном проникновении внутрь дефекта индикаторных жидкостей, хорошо смачивающих материал объекта – поверхность контроля и последующей регистрации индикаторных следов (благодаря чему так же носит название цветная дефектоскопия).

В соответствии с техническими требованиями в большинстве случаев необходимо выявлять настолько малые дефекты, что заметить их при визуальном осмотре невооруженным глазом практически невозможно. В то же время применение оптических приборов, например лупы или микроскопа, не позволяет выявить поверхностные дефекты из-за недостаточной контрастности изображения дефекта на фоне металла и малого поля зрения при больших увеличениях.

В таких случаях наиболее применим - капиллярный метод контроля. Капиллярная дефектоскопия позволяет контролировать объекты любых размеров и форм, изготовленные из различных материалов: черных и цветных металлов, сплавов, пластмасс, стекла, керамики и т.п.

Области применения:

- авиастроение;
- автомобилестроение;
- машиностроение;
- судостроение;
- строительство ядерных реакторов;
- металлургия;
- электротехника;
- литейное производство.

Капиллярный контроль широко востребован при дефектоскопии сварных швов.

При контроле красящий пенетрант наносится на контролируемую поверхность и благодаря своим особым качествам под действием капиллярных сил проникает в мельчайшие дефекты, имеющие выход на поверхность объекта контроля.

Проявитель, наносимый на поверхность объекта контроля через некоторое время после осторожного удаления с поверхности пенетранта, растворяет находящийся внутри дефекта краситель и за счет диффузии “вытягивает” оставшийся в дефекте пенетрант на поверхность объекта контроля. Имеющиеся дефекты видны достаточно контрастно. Индикаторные следы в виде линий указывают на трещины или царапины, отдельные точки - на поры.

Перечень основных национальных и европейских стандартов и нормативных документов по капиллярному неразрушающему контролю:

- ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
- ГОСТ 24522-80 Контроль неразрушающий капиллярный. Термины и определения.
- ГОСТ 28369-89 Контроль неразрушающий. УФ-облучатели. Общие технологические требования.
- ГОСТ 23349-84 Контроль неразрушающий. Дефектоскопы капиллярные. Общие технологические требования. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
- ОСТ 26-5-99 Контроль неразрушающий. Цветной метод контроля сварных соединений, наплавленного и основного металла.
- ОСТ 36-76-83 Контроль неразрушающий. Сварные соединения трубопроводов и конструкций. Цветной метод.
- ОСТ 108.004.101-80 Контроль неразрушающий. Люминесцентный, цветной и люминесцентно-цветной методы. Основные положения.
- ОСТ 95.955-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Метод капиллярный.
- ОСТ 26-5-88 Контроль неразрушающий. Цветной метод контроля сварных соединений, направленного и основного металла.
- РД 153-34.1-17.461-00 Методические указания по капиллярному контролю сварных соединений, наплавов и основного металла при изготовлении, монтаже, эксплуатации и ремонте объектов энергетического оборудования.
- РДИ 38.18.019-95 Инструкция по капиллярному контролю деталей технологического оборудования, сварных соединений и наплавов.
- РД-13-06-2006 Методические рекомендации о порядке проведения капиллярного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
- ПНАЭ Г-7-010-89 Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля.
- ПНАЭ Г-7-018-89 Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ. Капиллярный контроль.
- EN 473 Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. Общие требования.
- EN 1289 Контроль неразрушающий сварных соединений. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Границы допустимости.
- EN ISO 3452-2 Неразрушающие испытания. Испытания проникающим веществом. Ч. 2. Испытания проникающих материалов.
- EN ISO 3452-3 Неразрушающий контроль. Проникающие испытания. Ч. 3. Эталонные контрольные блоки.
- EN ISO 3452-4 Неразрушающий контроль. Проникающие испытания. Ч. 4. Оборудование.
- ISO 3059 Неразрушающий контроль. Капиллярный и магнитопорошковый методы. Условия наблюдения
- ISO 9935 Методы неразрушающего контроля. Проникающая дефектоскопия. Общие технические требования.
- ISO 12706 Испытания без разрушения. Терминология. Термины, применяемые при проникающем испытании

- ISO/TS 18173 Испытания неразрушающие. Общие термины и определения

Согласно ГОСТ 18442-80 класс чувствительности контроля определяется в зависимости от размера выявляемых дефектов. В качестве параметра размера дефекта принимается поперечный размер дефекта на поверхности объекта контроля – так называемая ширина раскрытия дефекта. Минимальная величина раскрытия выявленных дефектов называется нижним порогом чувствительности и ограничивается тем, что весьма малое количество пенетранта, задержавшееся в полости небольшого дефекта, оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Существует также верхний порог чувствительности, который определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пенетрант вымывается при устранении излишков пенетранта на поверхности.

Обнаружение индикаторных следов, соответствующего указанным выше основным признакам, служит основанием для анализа о допустимости дефекта по его размеру, характеру, положению.

ГОСТ 18442-80 установлено 5 классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов (табл. 2).

Таблица 2

Классы чувствительности	
Класс чувствительности	Ширина раскрытия дефекта, мкм
I	Менее 1
II	От 1 до 10
III	От 10 до 100
IV	От 100 до 500
технологический	Не нормируется

Капиллярный контроль наряду с другими физическими методами (визуально-измерительный контроль, рентгенографический контроль, ультразвуковой контроль, магнитно-порошковый контроль) является надежным и высокоэффективным средством для выявления возможных поверхностных дефектов. Требуется наличия специально подготовленных специалистов, специализированного оборудования и вспомогательных средств контроля, и, кроме того, предъявляет особые требования к подготовке поверхности изделия под контроль.

К недостаткам капиллярного контроля следует отнести его высокую трудоемкость при отсутствии механизации, большую длительность процесса контроля (от 0.5 до 1.5 ч), а также сложность механизации и автоматизации процесса контроля; снижение достоверности результатов при отрицательных температурах; субъективность контроля - зависимость достоверности результатов от профессионализма оператора; ограниченный срок хранения дефектоскопических материалов, зависимость их свойств от условий хранения.

Некоторые производители в целях экономии или некомпетентности игнорируют проведение неразрушающего контроля продукции или вспоминают о нём только на последней стадии - уже непосредственно перед сдачей объекта (а это приводит к дополнительной потере времени и непредусмотренным расходам), когда контроль бывает технически неосуществим. Подобное отношение к контролю качества чаще всего приводит к аварийным ситуациям в процессе эксплуатации и способно привести даже техногенным катастрофам.

2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

Общие положения согласно п. 1.

2.1. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

Элементы современной физической картины мира

2.2. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

Измерения и измерительные системы

2.3. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 3

Фундаментальные пределы точности измерений

2.4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 4

Физические явления и их классификация

2.5. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 5

Физические явления, используемые в измерениях

2.6. ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 6

Физические явления в технике

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко, Е.Г. и др. Методы контроля качества в машиностроении [Текст]: учеб. пособие / Е.Г. Кравченко, Б.Я. Мокринский, А.С. Верещагина. – Старый Оскол: ООО «Точные наукоемкие технологии», 2017. – 132 с.; ил.
2. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль [Текст]: справочник в 5 т. / под ред. Клюева. – М.: Машиностроение, 2003.
3. Современные методы контроля материалов без разрушения, под ред. С. Т. Назарова, 2004.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ.....	3
1.1. ФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДАХ КОНТРОЛЯ.....	3
1.2. МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ.....	11
1.3. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ.....	13
1.4. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ.....	21
1.5. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ПРОНИКАЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ.....	28
2. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ.....	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	32

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению практических работ
для студентов направления подготовки магистров
15.04.01 «Машиностроение»
(профиль «Обеспечение качественно-точностных характеристик
при изготовлении изделий в автоматизированном машиностроительном
производстве») всех форм обучения

Составитель:
Краснова Марина Николаевна

Издается в авторской редакции
Компьютерный набор Е. Д. Зотовой

Подписано к изданию 03.12.2021.
Уч.-изд. л. 2,1.

ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
технический университет"
394026 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84