

Серия
КЛАССИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТСКИЙ УЧЕБНИК

КЛАССИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТСКИЙ УЧЕБНИК

Редакционный совет серии

Председатель совета

В.И. Нифадьев, д-р техн. наук, профессор, академик НАН КР,
ректор Кыргызско-Российского Славянского университета
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина

Члены совета:

В.М. Лелевкин, д-р физ.-мат. наук, профессор, проректор
по научной работе КРСУ, академик МАИ,

Л.Ч. Сыдыкова, д-р юрид. наук, профессор, проректор
по международным связям КРСУ,

С.Ф. Усманов, д-р техн. наук, профессор, проректор по учебной работе КРСУ,
Н.А. Бровко, д-р экон. наук, профессор, декан экономического факультета КРСУ,

Г.Д. Джунушалиева, д-р ист. наук, доцент, зав. кафедрой
«Реклама и связи с общественностью» гуманитарного факультета КРСУ,

А.Г. Зарифьян, канд. мед. наук, профессор, декан
медицинского факультета КРСУ,

Б.А. Какеев, д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой
патологической физиологии медицинского факультета КРСУ,

Г.В. Лоцев, канд. техн. наук, доцент, декан
естественно-технического факультета КРСУ,

Р.М. Муксинов, д-р архитектуры, профессор, декан
факультета архитектуры, дизайна и строительства КРСУ, академик ААиС,

Б.Г. Тугельбаева, д-р юрид. наук, профессор, декан
юридического факультета КРСУ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени первого Президента Российской Федерации Б.Н. Ельцина
ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра «Приборостроение»

А.П. Муслимов

НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

Учебник

Допущено Министерством образования и науки
Кыргызской Республики в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений

Бишкек 2022

УДК 658.6
ББК 30.607
М 91

Рецензенты:

Б.С. Султаналиев, д-р техн. наук, профессор,
директор Института «Машиноведение и автоматика» НАН КР,
И.В. Бочкарев, д-р техн. наук, профессор
Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова,
М.М. Шамсутдинов, д-р техн. наук, профессор КРСУ им. Б.Н. Ельцина

Рекомендовано к изданию Ученым советом ГОУВПО КРСУ им. Б.Н. Ельцина

Муслимов А.П.

М 91 НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ПРОДУКЦИИ: учебник. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2022. – 308 с.

ISBN 978-9967-19-909-5

В предлагаемом учебнике впервые обобщены все имеющиеся сведения по неразрушающему контролю, проводимому с использованием отечественного и зарубежного оборудования и приборов.

Приведены основные сведения по методам контроля, широко применяемым в производстве во всех отраслях машиностроения, главным образом по дефектоскопическому контролю, используемому для обнаружения нарушения сплошности металла. Также рассмотрены перспективные методы контроля, разрабатываемые для различных отраслей промышленности.

Учебник составлен на основе обобщения отечественных и зарубежных публикаций последнего времени по неразрушающему контролю, а также на основе опыта автора в проведении научно-исследовательских работ в области дефектоскопии, разработке конструкций дефектоскопов и методических руководств, а также практического применения методов неразрушающего контроля.

Предназначен для студентов-бакалавров, магистрантов и специалистов, занимающихся вопросами использования методов неразрушающего контроля.

ISBN 978-9967-19-909-5

УДК 658.6
ББК 30.607
© ГОУВПО КРСУ, 2022
© Муслимов А.П., 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	8
1. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ	10
1.1. История развития методов неразрушающего контроля.....	11
1.2. Классификация неразрушающих методов контроля.....	13
1.3. Эффективность неразрушающих методов контроля.....	19
1.4. Нормативно-техническая документация.....	25
1.5. Преимущества неразрушающих методов контроля.....	25
2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	29
2.1. Задачи, решаемые с применением методов неразрушающего контроля.....	29
2.2. Виды обнаруживаемых дефектов металла.....	30
2.2.1. Характеристики дефектов типа нарушения сплошности металла.....	31
2.2.2. Дефекты, возникающие в деталях при эксплуатации машин	32
2.3. Общие требования к средствам дефектоскопического контроля	33
2.4. Механизация и автоматизация неразрушающего контроля	33
2.5. Общие требования к контролерам-дефектоскопистам	34
2.6. Технические возможности методов дефектоскопического контроля.....	35
2.7. Рекомендации по выбору методов неразрушающего контроля	39
3. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ	42
3.1. Области применения и сущность визуально-оптического контроля. Требования к оптическим приборам	42
3.1.1. Классификация оптических приборов для визуально-оптического контроля	43
3.1.2. Общие требования к приборам для визуально-оптического контроля	44
3.2. Назначение, типы, технические характеристики и конструктивные особенности жестких эндоскопов.....	45
3.3. Назначение, типы, технические характеристики и конструктивные особенности гибких жгутов и эндоскопов.....	46
3.4. Контроль изделий с применением оптико-электронных систем анализа изображения. Классификация системы.....	50
4. КАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ	52
2.1. Классификация и области применения капиллярной дефектоскопии	52
4.2. Физические основы контроля методами капиллярной дефектоскопии ...	58
4.2.1. Метод смачивания	58

4.2.2. Капиллярные явления	59
4.2.3. Сорбционные явления.....	61
4.3. Технологические операции капиллярной дефектоскопии и особенности их выполнения	62
4.3.1. Основные технологические операции капиллярной дефектоскопии	62
4.3.2. Удаление проникающей жидкости с поверхности деталей.....	65
4.3.3. Нанесение проявителя	66
4.3.4. Проявление дефектов	69
4.3.5. Осмотр деталей и анализ рисунка дефектов.....	71
4.4. Варианты технологических схем контроля с применением различных методов и материалов	72
4.4.1. Контроль цветным порошковым методом деталей цехового оборудования, установок и трубопроводов	72
4.4.2. Контроль цветным красочным методом сварных швов топливных трубопроводов летательных аппаратов в условиях ремонтного предприятия для обнаружения трещин усталости	72
4.4.3. Контроль цветным красочным методом деталей из магниевых сплавов в условиях эксплуатации	73
4.4.4. Контроль люминесцентно-порошковым методом литых алюминиевых деталей в условиях производства.....	73
4.4.5. Контроль люминесцентно-красочным методом титановых лопаток ГТД в условиях производства после шлифования.....	74
4.4.6. Контроль люминесцентно-красочным методом дисков ротора турбины ГТД в условиях ремонтного предприятия	74
4.4.7. Контроль люминесцентным методом лопаток ротора турбины ГТД в условиях производства после литья.....	75
5. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД.....	77
5.1. Классификация ультразвуковых неразрушающих методов контроля	78
5.2. Технология ультразвукового контроля	83
5.2.1. Способы контроля	87
5.2.2. Особенности контроля	89
5.3. Аппаратура для ультразвукового контроля	95
6. РАДИАЦИОННЫЙ МЕТОД.....	100
6.1. Классификация радиационных неразрушающих методов контроля.....	102
6.2. Технология радиографического контроля.....	111
6.3. Аппаратура для радиационного контроля.....	115
7. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	120
7.1. Вихретоковые МНК	120
7.2. Сущность магнитных методов неразрушающего контроля	126
7.3. Магнитопорошковый метод	128

7.4. Индукционный метод.....	129
7.5 Феррозондовый метод.....	130
7.6. Магнитографический метод.....	131
7.7. Метод эффекта Холла.....	132
7.8. Применение магнитных методов неразрушающего контроля в обнаружении дефектов в современной промышленности	133
7.9. Разработка информационной системы	135
7.10. Расчет математической модели инерционной части информационного устройства.....	145
8. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ.....	150
8.1. Основные понятия и требования к оптико-электронным датчикам	150
8.2. Основные энергетические и световые характеристики излучения.....	165
8.3. Структурная схема оптико-электронного прибора	166
8.4. Анализ устройств контроля качества поверхности цилиндрических деталей оптическим методом	168
8.5. Разработка схемы излучателя и приемника	170
8.6. Разработка принципиальных схем устройства контроля качества поверхностей деталей	174
8.7. Исследование переотражения излучения в элементах поверхности. Основные положения	183
8.8. Разработка принципиальных схем автоматического оборудования контроля качества продукции машиностроения	203
8.8.1. Автомат контроля дисбаланса изделий ультразвуковым методом	203
8.8.2. Автомат контроля рельефных дефектов изделий	205
8.8.3. Автомат контроля наружных дефектов изделий типа тел вращения	207
8.8.4. Автомат контроля наличия фасок у изделий типа тел вращения.....	209
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	212

ВВЕДЕНИЕ

Повышение уровня надежности и увеличение ресурса машин и других объектов техники возможно только при условии выпуска продукции высокого качества во всех отраслях машиностроения. Это требует непрерывного совершенствования технологии производства и методов контроля качества. В ряде случаев выборочный контроль исходного металла, заготовок, полуфабрикатов и готовых изделий ответственного назначения на заводах не гарантирует их высокое качество, особенно при серийном и массовом изготовлении.

В настоящее время все более широкое распространение получает 100 %-ный неразрушающий контроль (НК) продукции на отдельных этапах производства. Для обеспечения высокой эксплуатационной надежности машин и механизмов большое значение имеет также периодический контроль их состояния без демонтажа или с ограниченной разборкой, производимый при обслуживании в эксплуатации или при ремонте.

В современных условиях стремительного научно-технического прогресса роль неразрушающего контроля значительно возросла. Без этого высокоэффективного и производительного контроля невозможно, например, развитие космической, авиационной и атомной техники и современной энергетики, а также обеспечение безопасности движения на транспорте.

В теоретических исследованиях методов неразрушающего контроля, в разработке технологии его проведения и создании необходимого оборудования большая заслуга принадлежит отечественным ученым и инженерам. Растет число специалистов, занимающихся неразрушающим контролем.

В настоящее время уже накоплен значительный опыт по применению такого контроля. Использование отдельных методов неразрушающего контроля отражено в монографиях, справочниках, ведомственных руководствах и пособиях, а также в статьях периодической литературы. Однако до сих пор нет работы, которая обобщала бы все методы неразрушающего контроля и комплексное их применение с учетом запросов специалистов, как на производстве, так и в эксплуатации. В предлагаемом учебнике впервые обобщены все имеющиеся сведения по неразрушающему контролю, проводимому с использованием отечественного и зарубежного оборудования и приборов.

Приведены основные сведения по методам контроля, широко применяемым в производстве во всех отраслях машиностроения, главным образом по дефектоскопическому контролю, используемому для обнаружения нарушения сплошности металла. Также рассмотрены перспективные методы контроля, разрабатываемые для различных отраслей промышленности.

Учебник составлен на основе обобщения отечественных и зарубежных публикаций последнего времени по неразрушающему контролю, а также на основе опыта автора в проведении научно-исследовательских работ в области дефектоскопии, разработке конструкций дефектоскопов и методических руководств, а также практического применения неразрушающего контроля.

1. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Неразрушающие методы контроля – это обобщающее название методов контроля материалов или изделий, используемых для обнаружения нарушения сплошности или однородности макроструктуры, отклонений химического состава и других целей, не требующих разрушения образцов материала и/или изделия в целом. Также неразрушающие методы контроля называют дефектоскопией (от лат. *defectus* – недостаток и от греч. *skopeo* – смотрю, рассматриваю, наблюдаю) – это комплекс методов и средств для обнаружения дефектов. Дефектоскопия включает: разработку методов и аппаратуру (дефектоскопы и др.); составление методик контроля; обработку показаний дефектоскопов.

Зачастую при изготовлении изделий в них, вследствие несовершенства технологии изготовления или в результате эксплуатации в тяжёлых условиях, появляются различные дефекты – нарушения сплошности или однородности материала, отклонения от заданного химического состава или структуры, а также от заданных размеров. Дефекты изменяют физические свойства материала (плотность, электропроводность, магнитные, упругие свойства и др.).

Перечислим основные требования, предъявляемые к неразрушающим методам контроля или дефектоскопии:

- Возможность осуществления контроля на всех стадиях изготовления, при эксплуатации и при ремонте изделий.
- Возможность контроля качества продукции по большинству заданных параметров.
- Согласованность времени, затрачиваемого на контроль, со временем работы другого технологического оборудования.
- Высокая достоверность результатов контроля.
- Возможность механизации и автоматизации контроля технологических процессов, а также управления ими с использованием сигналов, выдаваемых средствами контроля.
- Высокая надёжность дефектоскопической аппаратуры и возможность использования её в различных условиях.
- Простота методик контроля, техническая доступность средств контроля в условиях производства, ремонта и эксплуатации.
- новыми областями применения неразрушающих методов контроля являются:
- Дефектоскопия особенно ответственных деталей и устройств (атомные реакторы, летательные аппараты, подводные и надводные плавательные средства, космические корабли и т. п.).

- Дефектоскопия деталей и устройств длительной эксплуатации (портовые сооружения, мосты, краны, атомные электростанции, котлы, искусственные спутники Земли).
- Непрерывная дефектоскопия особо ответственных агрегатов и устройств (котлы атомных, тепло- и электростанций).
- Контроль подземных выработок.
- Проведение исследований структуры материалов и дефектов в изделиях с целью совершенствования технологии.

Неразрушающий контроль также называют оценкой надёжности неразрушающими методами или проверкой без разрушения изделия. Неразрушающий контроль особенно важен при создании и эксплуатации жизненно важных изделий, компонентов и конструкций. Для выявления различных изъянов, таких как разъедание, ржавление, растрескивание.

1.1. История развития методов неразрушающего контроля

28 декабря 1895 г. Вильгельм Рентген опубликовал статью «О новом типе лучей». Использование лучей нового типа – рентгеновских – впоследствии легло в основу одного из методов неразрушающего контроля.

Визуальный контроль – наиболее древний метод неразрушающего контроля. Визуальная оценка контролируемых деталей невооруженным глазом является, как правило, первым и обязательным звеном неразрушающего контроля.

Впервые в СССР использовать капиллярный контроль для обнаружения трещин предложил в 1931 г. В.П. Сухарников. Для этого он рекомендовал смесь масла с керосином в качестве проникающей жидкости и проявителя – любой белой масляной краски. Контроль длился несколько часов. Дефекты выявлялись после высыхания краски в виде сероватых маслянистых пятен, имеющих яркостной контраст с фоном.

В 1942 г. В.С. Краснова предложила способ люминесцентного контроля с применением раствора автола или машинного масла в бензине или керосине. Несколько позже, в 1944–1945 гг. Д.С. Шрайбер и Л.П. Спасский разработали люминесцентный способ контроля с использованием нагретого до 50 °С трансформаторного масла и порошков окиси магния или углекислого магния.

В 1951 г. Н.П. Кичиным совместно со М.Ф. Ставинской были предложены новые материалы для цветной дефектоскопии. Проникающая жидкость содержала бензин, керосин и темно-красный краситель, а проявителем служила разбавленная нитроэмаль. В 1956 г. Н.П. Кичин и С.И. Калашников разработали материалы для цветной дефектоскопии на основе бензола, которые впервые стали изготавливаться серийно на Львовском лакокрасочном заводе. В последующем в отечественной и зарубежной технической литературе ежегодно публиковалось не менее пяти работ о совершенствовании материалов и технологии капиллярной дефектоскопии.

Начало применения магнитопорошкового метода относится к 1910–1912 гг., когда академик А.Н. Крылов применил его для контроля ферромагнитных изделий массового производства.

В 1927 г. изобретатель Ф.М. Карпов разработал дефектоскоп-электромагнит для контроля осей и колесных пар вагонов. С тех пор стали развиваться теория и практика магнитопорошкового контроля, были установлены основные закономерности, разработаны различные дефектоскопы и измерительная аппаратура, проводились исследования магнитных индикаторов. В развитие магнитопорошкового метода внесли значительный вклад Н.С. Акулов, Р.И. Янус, Н.И. Еремин, А.В. Жигadlo и другие ученые.

Первый в России импульсный эхо-дефектоскоп был создан в 1948 г. С.Я. Соколовым. В 1950 г. Д.С. Шрайбер (ВИАМ) разработал эхо-импульсный дефектоскоп другого типа. И.Н. Ермолов (ЦНИИТМАШ) – один из крупнейших ученых в области ультразвуковой дефектоскопии создал теорию распространения и отражения ультразвуковых волн.

Методики ультразвукового контроля деталей и узлов самолетов и авиационных двигателей в условиях эксплуатации и ремонта разработаны Б.И. Выборновым. Им созданы методики контроля лопаток турбин и компрессоров, кожухов камер сгорания двигателей, барабанов авиационных колес, разработан ряд портативных ультразвуковых дефектоскопов (УЗДЛ-61–2М, УЗДК-1, УЗДБ-1). Ультразвуковой импульсный эхо-метод широко используется для контроля деталей ВС с применением современных микропроцессорных ультразвуковых дефектоскопов УИУ-СКАНЕР и УД2В-П45.

Импедансный метод с использованием изгибных колебаний предложен в 1958 г. Ю.В. Ланге (ВИАМ) и А.В. Римским-Корсаковым (Акустический институт АН) и в дальнейшем разработан Ю.В. Ланге. ВИАМ совместно с СКВ УЗД (В.Т. Бобров, А. Д. Гольден) и заводом «Электроточприбор» (С.М. Шварцман) создали несколько моделей акустических импедансных дефектоскопов серии НАД, которые выпускались серийно. Затем в МНПО «Спектр» (Ю.В. Ланге, Е.Г. Устинов) был разработан дефектоскоп серии АД-40И, затем АД-42И, ИД-91 и др.

Вихретоковый метод контроля основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля, создаваемого вихретоковым преобразователем (катушкой), с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом электропроводном объекте. Вихревые токи были открыты в 1825 г. французским физиком Д.Ф. Арго и исследованы его учеником Л. Фуко, именем которого и были названы (токи Фуко).

В 1831 г. английский физик М. Фарадей открыл закон электромагнитной индукции и объяснил причину возникновения вихревых токов. Впервые применил вихревые токи для неразрушающего контроля англичанин Д.Е. Хьюз в 1879 г. Ученые В.К. Аркадьев и Л.Р. Нейман разработали теорию электромагнитного поля, в том числе применительно к возникновению вихревых токов в электропроводящих телах.

Огромную роль в создании теории вихретокового контроля сыграли фундаментальные работы в области индукционного нагрева, выполненные в 1938–1950 гг. В.П. Вологдиным, Г.И. Бабатом, Н.М. Радигиным.

Вихретоковый контроль особенно бурно развивался в 50–90-х годах XX в. В это время такими крупными учеными, как В.В. Ключев, Ю.К. Федосенко, В.Г. Герасимов, В.В. Сухоруков были созданы научные школы, которые успешно работают и по сей день. П.И. Беда внедрил вихретоковый метод контроля в военной авиации. Были разработаны вихретоковые дефектоскопы различного назначения – типа «ЭМИД», ДНМ-15, ДНМ-500, ВДЦ-1, ВДЦ-3, ЛПД-3 и др.

Современное состояние рентгенографического контроля в авиации обеспечено трудами крупных научных центров (НИАТ, ВИАМ, ГЛИ, МНПО «Спектр», ВНИИТФА и др.) и неразрывно связано с именем профессора С.В. Румянцева и его школой (Ю.А. Григорович, В.А. Добромислов, С.И. Борисов, В.А. Гольцев и др.).

В монографиях, справочниках и статьях С.В. Румянцева изложены теория и практика радиационного контроля по ряду направлений: радиографии, радиационной интроскопии, радиометрии и др. В течение многих лет его монографии служат настольной книгой специалистов по радиационной дефектоскопии. Исследования сотрудников ВИАМ А.К. Трапезникова и С.В. Черноброва относятся к первым работам в области рентгенографического контроля. Большой вклад в развитие этого направления внесли: томская школа физиков, основанная профессором А.А. Воробьевым, МНЛО «Спектр» (радиационная интроскопия, вычислительная томография – А.М. Якобсон, Ф.Р. Соснин и др.) и другие научные школы. Были созданы различные типы рентгеновских аппаратов, в том числе работающих в импульсном режиме.

1.2. Классификация неразрушающих методов контроля

В ГОСТ 18353–79 приведена классификация видов и методов неразрушающего контроля, в основу которой положен физический процесс с момента взаимодействия физического поля или вещества с контролируемым объектом до получения первичной информации.

Неразрушающий контроль, в зависимости от физических явлений, положенных в его основу, подразделяется на виды:

- магнитный,
- электрический,
- вихретоковый (электромагнитный),
- радиоволновой,
- тепловой,
- оптический,
- радиационный,
- акустический (ультразвуковой).

Также выделяют капиллярный метод и контроль течеискания.

Методы каждого вида неразрушающего контроля классифицируются по следующим признакам:

- 1) характеру взаимодействия физических полей или веществ с контролируемым объектом;
- 2) первичным информативным параметрам;
- 3) способам получения первичной информации.

В названии метода должны присутствовать классификационные признаки, изложенные выше, свойственные данному методу неразрушающего контроля. Допускается применение комбинированных методов одного или нескольких видов неразрушающего контроля, классифицируемых по различным признакам.

Классификация методов неразрушающего контроля приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Классификация методов неразрушающего контроля

Вид контроля	Вид классификации		
	по характеру взаимодействия физических полей с контролируемым объектом	по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации
1	2	3	4
Магнитный	Магнитный	Коэрцитивной силы Намагниченности Остаточной индукции Магнитной проницаемости Напряженности Эффекта Баркгаузена	Магнитопорошковый Индукционный Феррозондовый Эффекта Холла Магнитографический Пондеромоторный Магниторезисторный
Электрический	Электрический Трибоэлектрический Термоэлектрический	Электродинамический Электростатический Электроемкостный	Электростатический порошковый Электропараметрический Электроискровой Рекомбинационного излучения Экзоэлектронной эмиссии Шумовой Контактной разности потенциалов
Вихретоковый	Прошедшего излучения Отраженного излучения	Амплитудный Фазовый Частотный Спектральный Многочастотный	Трансформаторный Параметрический

1	2	3	4
Радиоволновой	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Резонансный	Амплитудный Фазовый Частотный Временной Поляризационный Геометрический	Детекторный (диодный) Болометрический Термисторный Интерференционный Голографический Жидких кристаллов Термобумаг Термолюминофоров Фотоуправляемых полупроводниковых пластин Калориметрический
Тепловой	Тепловой контактный Конвективный Собственного излучения	Термометрический Теплометрический	Пирометрический Жидких кристаллов Термокрасок Термобумаг Термолюминофоров Термозависимых параметров Оптический интерференционный Калориметрический
Оптический	Прошедшего излучения Отраженного излучения Рассеянного излучения Индукцированного излучения	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Поляризационный Геометрический. Спектральный	Интерференционный Нефелометрический Голографический Рефрактометрический Рефлексометрический Визуально-оптический
Радиационный	Прошедшего излучения Рассеянного излучения Активационного анализа Характеристического излучения Автоэмиссионный	Плотности потока энергии Спектральный	Сцинтилляционный Ионизационный Вторичных электронов Радиографический. Радиоскопический
Акустически (ультразвуковой)	Прошедшего излучения Отраженного излучения (эхо-метод) Резонансный Импедансный Свободных колебаний Акустико-эмиссионный	Амплитудный Фазовый Временной Частотный Спектральный	Пьезоэлектрический Электромагнитно-акустический Микрофонный Порошковый

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении капель индикаторных жидкостей в полости поверхностных дефектов. При контроле этими методами на очищенную поверхность детали наносят проникающую жидкость, которая заполняет полости поверхностных дефектов. Затем жидкость удаляют, а оставшуюся в полостях дефектов ее часть обнаруживают с помощью проявителя, который образует индикаторный рисунок. Капиллярные методы используются в полевых, цеховых и лабораторных условиях в широком диапазоне положительных и отрицательных температур. Они позволяют обнаруживать термические и шлифованные трещины, волосовины, закаты и пр. Капиллярные методы могут быть применены для обнаружения дефектов в деталях из металлов и неметаллов простой и сложной формы.

Акустические методы основаны на регистрации колебаний, возбуждаемых или возникающих в контролируемом объекте. Их применяют для обнаружения поверхностных и внутренних дефектов (нарушений сплошности, неоднородности структуры, межкристаллитной коррозии, дефектов склейки, пайки, сварки и т. п.) в деталях и изделиях, изготовленных из различных материалов. Они позволяют контролировать геометрические параметры при одностороннем допуске к изделию, а также физико-механические свойства металлов и металлоизделий без их разрушения. В настоящее время разработаны и успешно применяются: теневой, резонансный, эхоимпульсный, эмиссионный, велосимметрический, импедансный и метод свободных колебаний. Эти методы называют также ультразвуковыми.

Магнитные методы контроля основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами, или на определении магнитных свойств контролируемых изделий.

Эти методы позволяют обнаружить дефекты типа несплошности материала (трещины, волосовины, закаты), а также определить механические характеристики ферромагнитных сталей и чугунов по изменению их магнитных характеристик.

Визуально оптические методы контроля основаны на взаимодействии светового излучения с контролируемым объектом.

По характеру взаимодействия различают методы:

- прошедшего излучения,
- отражённого излучения,
- рассеянного излучения,
- индуцированного излучения (имеется в виду оптическое излучение предмета под действием внешнего воздействия, например люминесценцию).

Информативными параметрами этих методов являются:

- амплитуда,
- фаза,
- степень поляризации,
- частота или частотный спектр,
- время прохождения света через объект,
- геометрия преломления или отражения излучения.

Оптические методы широко применяют из-за большого разнообразия способов получения первичной информации о наличии наружных дефектов независимо от материала контролируемого изделия.

Радиационные методы контроля основаны на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения. Используется рентгеновское, гамма-излучение, потоки нейтрино и т. д. Проходя через толщу изделия, проникающие излучения по-разному ослабляются в дефектном и бездефектном сечениях и несут информацию о внутреннем строении вещества и наличии дефектов внутри изделия. Эти методы используются для контроля сварных и паяных швов, отливок, проката и т. п.

Радиоволновые методы основаны на регистрации параметров электромагнитных волн радиодиапазона, взаимодействующих с контролируемым объектом. Обычно используются волны сверхвысокочастотного диапазона длиной 1–100 мм для контроля изделий из материалов, где радиоволны затухают не очень сильно:

- диэлектрики (пластмасса, керамика, стекловолокно),
- магнитодиэлектрики (ферриты),
- полупроводники,
- тонкостенные металлические объекты.

Так же, как оптические и акустические, различают методы прошедшего, отраженного, рассеянного излучения и резонансный метод.

Тепловые методы основаны на регистрации изменений тепловых или температурных полей контролируемых объектов. Они применимы к любым материалам. Тепловые методы бывают двух видов:

- пассивный метод – на объекты не воздействуют внешним источником тепла;
- активный метод – объект нагревают или охлаждают.

Измеряемым информативным параметром является температура или тепловой поток.

При пассивном методе измеряют температурное поле работающего объекта. Дефект определяется появлением мест повышенной (пониженной) температуры. Таким методом определяют места утечки теплоты в зданиях; трещины в двигателях и т. д.

При контроле активным методом объект нагревают контактным или бесконтактным способом и измеряют температуру с той или другой стороны объекта. Это позволяет обнаруживать несплошности (трещины, пористость, инородные включения) в объектах, изменения в структуре физико-механических свойств материала по изменению теплопроводности, теплоёмкости, коэффициенту теплопередачи. Измерение температуры или тепловых потоков выполняют контактным или бесконтактным способом.

Наиболее эффективное средство бесконтактного наблюдения – сканирующий тепловизор. Его используют для определения дефектов пайки многослойных изделий из металлов и неметаллов, клеевых соединений и т. п.

Методы контроля течеисканием основаны на регистрации индикаторных жидкостей и газов, проникающих в сквозные дефекты контролируемых объектов. Их применяют для контроля герметичности работающих под давлением сварных сосудов, баллонов, трубопроводов, топливной и гидроаппаратуры, масляных систем силовых установок и т. п.

К методам течеискания относят:

- гидравлическую опрессовку,
- аммиачно-индикаторный метод,
- контроль с помощью гелиевого и галоидного течеискателей и т. д.

Проводят течеискание и с помощью радиоактивных веществ, что значительно повышает чувствительность метода.

Электрические методы основаны на регистрации параметров электрического поля, взаимодействующего с контролируемым объектом (собственно электрический метод), или поля, возникающего в контролируемом объекте в результате внешнего воздействия (термоэлектрический или трибоэлектрический методы).

Первичными информативными параметрами является электрическая ёмкость или потенциал. Ёмкостный метод используется для контроля диэлектрических или полупроводниковых материалов. По изменению проводимости, в частности её реактивной части, контролируют химический состав пластмасс, полупроводников, наличие в них несплошностей; влажность сыпучих материалов и другие свойства.

Для контроля проводников применяют метод электрического потенциала. Толщину проводящего слоя, наличие несплошностей вблизи поверхностей проводника контролируют, измеряя падение потенциала на некотором участке. Электрический ток огибает поверхностный дефект, по увеличению падения потенциала на участке с дефектом определяют глубину несплошности с погрешностью в несколько процентов.

Термоэлектрический метод применяют для контроля химического состава материала. Например, нагретый до постоянной температуры медный электрод прижимают к поверхности изделия и по возникающей разности потенциалов определяют марку стали, титана, алюминия или другого материала.

Разновидностью электрического метода является метод электронной эмиссии, то есть измерение эмиссии ионов с поверхности изделия под влиянием внутренних напряжений. Этот метод используется для определения растрескиваний в эмалевых покрытиях, для сортировки деталей, измерения толщины пленочных покрытий и определения степени закалки изделия.

Электромагнитный метод (вихревых токов) основан на регистрации изменений взаимодействия электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этой катушкой в КО. Его применяют для обнаружения поверхностных дефектов в магнитных и немагнитных деталях, и полуфабрикатах. Метод позволяет обнаруживать нарушения сплошности (в основном трещины) на различных по конфигурации деталях.

1.3. Эффективность неразрушающих методов контроля

Эффективность неразрушающих методов контроля определяется большим числом факторов, главными из которых являются: выявление дефектов, производительность, оперативность, безопасность и стоимость.

Визуальные и капиллярные методы контроля изделий из ферромагнитных материалов позволяют обнаруживать дефекты только на поверхности изделия.

Магнитными и токовихревыми методами можно обнаружить как поверхностные, так и подповерхностные дефекты.

Радиационными и акустическими методами можно обнаружить поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты.

В таблице 1.2 приведены примерные оценки различных методов контроля по выявляемости дефектов в изделиях из различных материалов различного назначения. Оценка неразрушающих методов контроля: 5 – отличная; 4 – хорошая; 3 – удовлетворительная; 0 – неудовлетворительная.

Таблица 1.2 – Оценка выявляемости дефектов различными видами неразрушающих методов контроля

Объект контроля	Вид НМК							
	Радиационный	Акустический	Токовихревой	Магнитный	Капиллярный	Тепловой	Оптический	Радиоволновой
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Неферромагнитные материалы								
Проволока диаметром, мм								
0,01–1	0	5	5	0	0	3	4	0
1–14	4	5	5	0	0	0	4	0
Прутки диаметром, мм								
3–40	5	5	5	0	0	0	4	0
30–100	5	5	5	0	0	0	4	0
156–1000	5	5	5	0	0	0	4	0
Листы, плиты толщ.								
0,1–1	4	5	5	0	4	3	4	3
0,1–3,9	5	5	5	0	4	0	4	0
4–10 и более	5	5	5	0	4	0	4	0
Сортовой прокат	5	5	4	0	4	0	4	0
Отливки	5	4	0	0	5	3	4	0
Ферромагнитные материалы								
Проволока	4	5	5	5	0	3	4	0
Прутки диаметром, мм								
3–4	5	5	5	5	0	0	4	0
30–10	5	5	5	5	0	0	4	0

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Трубы сварные диаметром, мм								
30–40	4	5	5	5	4	0	4	0
50–150	3	5	5	5	4	0	4	0
150–1000	4	5	5	5	4	0	4	0
Листы, плиты толщ., мм								
0,1–1	3	5	5	5	4	3	4	3
0,1–3,9	3	5	5	5	4	0	4	0
4–10 и более	3	5	4	4	4	0	4	0
Сортовой прокат	3	5	3	3	4	0	4	0
Отливки	3	4	3	3	4	0	4	0
Диэлектрики								
Резина	5	4	0	0	4	0	4	5
Керамика, металлокерамика	5	4	0	0	4	3	4	5
Бетон, железобетон	3	5	0	0	4	0	4	5
Монокристалл	3	4	0	0	0	5	4	5
Многослойные материалы	4	5	0	0	0	3	0	5
Стекло	3	4	0	0	0	3	5	3
Стеклопластик	3	4	0	0	5	5	5	5
Соединения								
Сварные	3	5	3	3	4	3	0	0
Клеевые	3	5	0	0	4	4	4	5
Паяные	3	5	3	0	3	3	0	0
Резьбовые	0	0	3	5	4	0	0	0
Детали к изделиям								
Многослойные конструкции из стеклопластика	3	4	3	0	0	3	0	4
Радиоэлектронные схемы и детали	3	0	0	0	0	5	3	4
Электровакuumные приборы	4	0	0	0	0	3	3	3

С точки зрения опасности для обслуживающего персонала выделяются радиационные методы. Определённой токсичностью обладают методы капиллярные и течеисканием при использовании определённых типов пробных веществ и ультрафиолетовых осветителей. Остальные методы неразрушающего контроля не оказывают заметного влияния на здоровье обслуживающего персонала. В таблице 1.3 приведены основные возможности и области применения методов неразрушающего контроля сплошности металлов.

С точки зрения автоматизации контроля наиболее благоприятны: методы вихревого тока, магнитные методы, радиационный и некоторые виды тепловых методов.

Таблица 1.3 – Возможности и области применения методов неразрушающего контроля

Метод	Объект контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля
Магнитный контроль	2	3	4	5
	Поковки, штамповки, сортовой прокат толщиной ≥ 10 мм	Внутренние трещины расслоения, флокены, неметаллические включения, а также (при малых толщинах и для сплошных цилиндров малого диаметра) поверхностные заковы, закаты, включения	Эквивалентная площадь дефекта ≥ 3 мм ² (в отдельных случаях $\geq 0,5$ мм ²)	Простая форма, обработка поверхности $R_z 10$
Акустический контроль	Слитки и фасонные отливки	Внутренние трещины, раковины, неметаллические включения, флокеноподобные дефекты	Эквивалентная площадь дефекта 5 мм ²	Простая форма, мелкозернистая структура, обработка поверхности $R_z 10$
	Листовой прокат толщиной $\geq 0,5$ мм	Внутренние расслоения и другие дефекты, ориентированные в плоскости прокатки	Эквивалентная площадь дефекта (≥ 1 мм ²) или условная площадь (≥ 5 см ²)	Очистка поверхности от грязи, отслаивающейся окалины
	Трубы диаметром ≥ 4 мм и толщиной ≥ 1 мм	Внутренние поверхностные трещины, риски, закаты, включения	Эквивалентная глубина дефекта ≥ 3 % от толщины стенки трубы	
	Сварные соединения стыковые, тавровые, угловые, крестообразные толщиной 6 мм	Внутренние трещины, непровары, газовые поры, включения, несплавления, утяжки	Эквивалентная площадь дефекта 3 мм ²	Мелкозернистая структура наплавленного металла

Продолжение таблицы 1.3				
1	2	3	4	5
Радиографический контроль	Сварные и резьбовые соединения	Непровары, трещины, поры, шлаковые включения, непропаи	Локальные дефекты размером 1,5–2 % от контролируемой толщины	Двусторонний доступ, отсутствие наружных дефектов, присутствие вышающих чувствительность контроля
Магнитный	Литые изделия	Трещины, раковины, рыхлоты, пористость	Локальные дефекты размером 2–4 % от контролируемой толщины	
Токовых	Металлические изделия, полуфабрикаты и сварные соединения	Поверхностные и подповерхностные трещины, волосовины, заковы, закаты, включения, флокены, непровары	Раскрытые дефекты ≥ 2 мм, глубина ≥ 20 мкм, протяженность 0,5 мм	Ферромагнитные металлы, частота обработки поверхности $R_z 2,5$
Капиллярный	Металлические изделия и полуфабрикаты	То же	Ширина дефекты $\geq 0,5$ мкм, глубина 100–200 мкм, протяженность 0,5–1 мм	Частота обработки поверхности $R_z 2,5$
Течеискания	Металлические изделия, полуфабрикаты и сварные соединения	Поверхностные открытые трещины, поры, коррозионные поражения	Раскрытые дефекта ≥ 1 мкм, протяженность 3–5 мм	Частота обработки поверхности $R_z 20$
	Конструкции и изделия энергетических узлов	Сквозные дефекты в сварных соединениях и основном металле	Дефекты, дающие натекание $> 6,7 * 10^{-11}, i^3 \cdot \dot{i} \dot{a} / \dot{n}$	Изделия, которые могут быть помещены в вакуумную камеру или воду, замкнутые и разомкнутые корпусные конструкции

Главные преимущества этих методов заключаются в отсутствии прямого контакта преобразователя с изделием и в предоставлении информации о дефектах в виде показаний приборов.

Ультразвуковой метод, с этой точки зрения, требует контакта преобразователя с изделием, например, через слой воды. Трудность автоматизации других методов контроля заключается в необходимости визуальной обработки информации о дефектах.

По стоимости выполнения контроля к наиболее дорогим относятся методы радиографические и течеискания. Это связано с длительностью операций контроля, а также с необходимостью капитальных затрат на помещения и оборудование. Если сравнивать, например, затраты на проведение радиационного и ультразвукового контроля сварных соединений толщиной 10–20 мм, то для ультразвукового контроля они будут в 3–5 раз меньше, чем для радиационного. Это преимущество возрастает с увеличением толщины сварных соединений.

В таблице 1.3 приведены не принципиальные возможности методов, а лишь те из них, которые могут быть реализованы с помощью серийной аппаратуры и имеют техническую документацию. В столбце 4 для ультразвукового контроля даны измеряемые параметры дефектов. В столбце 5 для поверхностных методов приведены требования к чистоте контролируемой поверхности, при которых могут быть выявлены дефекты, указанные в столбце 4 для соответствующего метода. При более грубых поверхностях чувствительность методов снижается.

Часто необходимо контролировать изделие двумя или более методами: обычно сочетают методы, способные обнаруживать внутренние и поверхностные дефекты (акустический и магнитный контроль; магнитопорошковый метод контроля, акустический и токовихревой контроль и т. д.) или плоские и объёмные дефекты (например, ультразвуковой контроль и радиография).

Комплексная система контроля несколькими методами может строиться на основе 100 % контроля всего объёма продукции каждым методом или на основе выборочного контроля тем или иным (или всеми) методом контроля. Иногда дополнительный контроль осуществляется только в тех участках, где основным методом не обеспечивается заданных требований, или назначается для повышения информативности.

В таблице 1.4 приведены основные достоинства и недостатки различных методов неразрушающего контроля сплошности металлов.

Приведём несколько примеров применения комплексных систем НК в судостроении. В особо ответственных случаях для повышения надёжности выявления дефектов различных типов проводят контроль сварных соединений методом радиационного просвечивания и акустическим. Контроль отливок, как правило, выполняют методом радиационного просвечивания, а акустический метод используют для определения местоположения выявленных дефектов. Контроль гребных винтов предусматривает сочетание акустических методов с поверхностными методами, такими как капиллярный, магнитный и токовихревой.

Таблица 1.4 – Достоинства и недостатки различных методов неразрушающего контроля

Метод	Достоинства	Недостатки
1	2	3
Акустический контроль	<p>Выявление дефектов с малым раскрытием, характерных для деформированного металла</p> <p>Возможность контроля больших толщин (до 2–5 м в зависимости от структуры металла)</p> <p>Высокая производительность и малая стоимость контроля</p> <p>Возможность автоматизации (при простой геометрической форме изделия)</p>	<p>Необходимость создания акустического контроля через жидкую среду и ограничения по чистоте обработки поверхности</p> <p>Малая чувствительность при контроле крупнозернистых материалов, например, литых изделий и сварных соединений из аустенитных сталей</p> <p>Отсутствие наглядности и сложность расшифровки результатов контроля, оценка размеров и формы дефектов с большими погрешностями</p>
Радиографический контроль	<p>Высокая чувствительность контроля</p> <p>Наглядность результатов контроля</p> <p>Наличие документа о результатах контроля</p>	<p>Радиационная опасность</p> <p>Большая длительность технологического цикла контроля</p> <p>Расход дорогостоящей радиографической панели</p>
Магнитный	<p>Простота и наглядность контроля</p> <p>Возможность применения метода для изделий любой формы</p>	<p>Загрязнение поверхности</p> <p>Необходимость размагничивания изделий после контроля</p> <p>Возможность образования прижогов на поверхности</p>
Токовихревой	<p>Бесконтактное возбуждение вихревых токов</p> <p>Возможность автоматизации при больших скоростях контроля с записью результатов</p> <p>Возможность контроля внутренних поверхностей</p> <p>Возможность контроля через немаetalлические покрытия</p>	<p>Трудность выделения полезного сигнала на фоне помех, обусловленных его зависимостью от многих параметров контролируемого изделия</p> <p>Отсутствие наглядности результатов контроля</p>
Капиллярный	<p>Простота и наглядность контроля</p> <p>Возможность контроля изделий различной формы</p>	<p>Необходимость удаления с поверхности защитных покрытий, смазок, окалины и других загрязнений</p>
Теческанивание	<p>Большой арсенал способов контроля различных классов изделий</p>	<p>Необходимость осушки изделий нагревом до 150–400 °С или применения различных индикаторных составов</p>

Контроль поковок, если заготовки не имеют припуска на «мертвую» зону ультразвукового искателя, также использует сочетание акустического и поверхностного методов дефектоскопии.

Для контроля внутренних поверхностей используются токовихревые методы и перископический осмотр (визуально-оптический метод контроля) или перископический осмотр и акустический контроль.

1.4. Нормативно-техническая документация

Для использования любого из методов неразрушающего контроля, сначала необходимо ознакомиться с существующей нормативно-технической документацией: гостами, техническими материалами, инструкциями, общими требованиями, руководящими документами. В таблице 1.5 приведены основные нормативно-технические документы, а также требуемое для реализации контроля того или иного метода оборудование.

К международным ассоциациям неразрушающего контроля относятся:

- EFNDT (European Federation for Non Destructive Testing – Европейская Федерация неразрушающего контроля).
- ICNDT (The International Committee for Non-Destructive Testing – Международный Комитет по неразрушающему контролю).
- РОНКТД (Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике – RSNTTD).

1.5. Преимущества неразрушающих методов контроля

Сама суть неразрушающих методов контроля отражается в слове «неразрушающий». Другими словами, для диагностики объект контроля не нужно демонтировать, нет необходимости в приостановке его эксплуатации или остановке производства для оценки качества изготавливаемой продукции.

Кроме этого, за счет использования приборов неразрушающего контроля появляется прекрасная и уникальная возможность диагностировать непосредственно то изделие, которое будет затем эксплуатироваться. Взять, например, некий котел. С помощью статистического метода контроля можно установить с вероятностью 98 %, что данный агрегат не взорвется. Разрушающий метод определит (разобрав прежде этот котел на мелкие детали), что раз конкретно в нем дефектов не обнаружено, то и в другом котле, произведённом по аналогичной технологии и на том же оборудовании, дефектов также не окажется. И только неразрушающий метод может дать гарантию, что именно это изделие прошло диагностику и именно оно пригодно к использованию. Причем, в отличие от большинства прочих методов, неразрушающий контроль не требует тщательной предварительной подготовки образцов.

Таблица 1.5 – Нормативно-техническая документация для неразрушающих методов контроля

Метод	Нормативно-техническая документация	Требуемое для его реализации оборудование
1 Визуально-измерительный	2 РД 03-606-03 Инструкция по визуальному и измерительному контролю ГОСТ 21105-87 Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод	3 Не требующий какого-либо оборудования метод неразрушающего контроля – может реализовываться с помощью простых измерительных средств
Магнитопорошковый	РД-13-05-2006 Методические рекомендации по порядку проведения магнитопорошкового контроля технических устройств	Устройство для размагничивания и намагничивания контролируемых объектов Магнитный индикатор (порошки, суспензии, магнитогуммированные пасты)
Капиллярный	ГОСТ 18442-80 Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования	Дефектоскопические материалы: пенетрант проявитель очиститель
Ультразвуковой	ГОСТ 14782-86 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые	Ультразвуковой дефектоскоп Преобразователи пьезоэлектрического типа (ПЭП) Стандартные образцы предприятий (СОП)
Радиационный	ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический контроль	Рентгеновский аппарат
Тепловой	ГОСТ 23483-79 Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования РД-13-04-2006 Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля	Тепловизор

Течеискание	ГОСТ 24054-80 Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытания на герметичность ПБ 03-593-03	Течеискатель
Акустико-эмиссионный	Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов РТМ 38.001-94	Акустико-эмиссионная система
Вибродиагностический	Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов	Вибродиагностический комплекс
	РД 08.00-60.30.00-КТН-016-1-05 Руководство по техническому обслуживанию и ремонту оборудования и сооружений нефтеперерабатывающих станций	
Вихретовый	РД-13-03-2006 Методические рекомендации о порядке проведения вихрекового контроля технических устройств и сооружений	Вихрековый дефектоскоп
Электрический	ГОСТ 25315-82 Контроль неразрушающий электрический	Электроискровой дефектоскоп

Есть здесь и еще одна особенность. Приборы неразрушающего контроля позволяют проверять объект как полностью, так и «фрагментарно», то есть только «опасные» его участки, которые вызывают наибольшие опасения с точки зрения эксплуатационной надёжности, склонны к износу и т. д. Разнообразие приборов неразрушающего контроля, у каждого из которых свой уровень чувствительности к определённому свойству материала, позволяет получать информацию о самых многочисленных характеристиках объекта. И самое важное – от воздействия на эти характеристики неразрушающего контроля объект своих качеств не теряет (что особенно важно, например, при контроле дорогостоящей продукции).

Наконец, с помощью неразрушающего контроля можно проводить анализ объектов не только при их сдаче в эксплуатацию или выпуске продукции. Традиционно часто практикуется ещё один способ (скорее даже «режим») применения приборов неразрушающего контроля – непрерывный контроль. В частности, это касается трубопроводов на АЭС и других объектов, подверженных большим нагрузкам и нуждающихся в постоянном наблюдении, притом, что в рамках проведения их контроля технологический процесс прерываться не должен.

То, что в последнее время развитие неразрушающего контроля все увереннее превращается в одно из важнейших и необходимых условий промышленной безопасности, неудивительно. Согласно статистике, каждый год в развитых странах по вине недостаточного качества выпускаемой продукции «теряется» 10 % национального дохода. В США только от коррозии металла потери составляют в год более 200 млрд долл., плюс более 100 млрд – от дефектов усталости. Что же касается нашей страны, то там потери от некачественных материалов и изделий, не секрет, заметно выше. Большая часть промышленной продукции по различным техническим и организационным причинам быстро выходит из строя; учитывая колоссальные ремонтные объёмы и нарушение экологических норм, потери морального и материального порядка возрастают в разы, требуя детального анализа и принятия взвешенных кардинальных решений.

Целью использования неразрушающего контроля в промышленности является надёжное выявление опасных дефектов. Поэтому выбор конкретных методов неразрушающего контроля определяется эффективностью обнаружения такого брака. На практике наибольшее распространение получил ультразвуковой контроль, как обладающий высокой чувствительностью, мобильностью и экологичностью, а также радиационный, успешно выявляющий опасные дефекты и объективно фиксирующий полученные результаты. В следующих главах подробно рассмотрим ультразвуковой и радиационный методы.

В зависимости от ставящихся задач, используют и другие методы контроля. Например, для поиска поверхностных дефектов – капиллярные, а для выявления сквозных – течеискание.

Электрические, магнитоэлектрические, магнитные и вихревые методы позволяют проводить контроль свойств проводящих сред, как правило, на поверхности и в подповерхностном слое. Более полным образом неразрушающий контроль осуществляется совокупностью нескольких методов.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2.1. Задачи, решаемые с применением методов неразрушающего контроля

Задача существенного улучшения качества промышленной продукции, а, следовательно, повышения надежности и долговечности машин может быть успешно решена при условии совершенствования производства и методов контроля качества продукции.

Контроль качества продукции заключается в проверке соответствия показателей ее качества установленным требованиям. Важными критериями высокого качества деталей машин являются физические, геометрические и функциональные показатели, а также технологические признаки качества, например, отсутствие недопустимых дефектов типа нарушения сплошности материала, соответствие физико-механических свойств и структуры основного материала и покрытия, геометрических размеров и чистоты обработки поверхности, требуемым технической документацией и др.

В настоящее время в производстве широко применяют неразрушающий контроль, позволяющий повысить качество продукции без нарушения ее пригодности к использованию по назначению.

Существующие средства НК предназначены для выявления дефектов типа нарушения сплошности материала изделий, оценки структуры материала изделий, контроля геометрических параметров изделий.

Контроль с применением дефектоскопов (приборов) основан на получении информации в виде электрических, световых, звуковых и других сигналов о качестве проверяемых объектов при взаимодействии их с физическими полями (электрическим, магнитным, акустическим и др.).

В зависимости от принципа работы контрольных средств все известные методы НК подразделяются на акустические, капиллярные, магнитные, оптические, радиационные, радиоволновые, тепловые, электрические и электромагнитные (методы вихревых токов).

В дефектоскопии для контроля металлов и изделий чаще всего применяют визуально-оптические, капиллярные, магнитные, токовихревые, ультразвуковые и радиационные методы, которые позволяют осуществить сплошной контроль. Только сплошной контроль, а не выборочный, дает гарантию высокого качества всех выпускаемых изделий. Перечисленные методы в большинстве случаев позволяют автоматизировать процесс контроля, благодаря чему достигается его высокая

производительность. В движущихся изделиях или в изделиях, нагретых до высоких температур, дефекты обнаруживаются путем бесконтактного контроля.

Применение НК на машиностроительных заводах и при эксплуатации машин в различных областях народного хозяйства дает значительный технический и экономический эффект. Использование его в эксплуатации позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность машин, а также безопасность движения на транспорте.

К НК предъявляются следующие основные общие требования:

1) возможность осуществления эффективного контроля на различных стадиях изготовления, в эксплуатации и при ремонте изделий;

2) возможность контроля качества продукции по большинству заданных параметров;

3) согласованность времени, затрачиваемого на контроль, со временем работы другого технологического оборудования;

4) высокая достоверность результатов контроля;

5) возможность механизации и автоматизации контроля технологических процессов, а также управления ими с использованием сигналов, выдаваемых средствами НК;

6) высокая надежность дефектоскопической аппаратуры и возможность использования ее в различных условиях;

7) простота методики контроля, техническая доступность средств контроля в условиях производства, ремонта и эксплуатации.

2.2. Виды обнаруживаемых дефектов металла

Дефектом называется каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией.

Дефекты подразделяют на явные, скрытые, критические, значительные и малозначительные, исправимые и неисправимые.

Явные поверхностные дефекты выявляют глазом, а внутренние, скрытые и поверхностные, не различимые глазом, – специальными средствами.

Выявленные дефекты в зависимости от возможного влияния их на служебные свойства детали могут быть критическими, значительными и малозначительными.

Критическим называется дефект, при наличии которого использование продукции по назначению невозможно или исключается из-за несоответствия требованиям безопасности или надежности; значительным – дефект, который существенно влияет на использование продукции по назначению на ее долговечность, но не является критическим; малозначительным – дефект, который не оказывает такого влияния.

По происхождению дефекты изделий подразделяют на производственно-технологические – металлургические, возникающие при отливке и прокатке,

технологические, возникающие при изготовлении и ремонте деталей (сварке/пайке, склеивании, клепке, механической, термической и других видах обработки, нанесении гальванических покрытий и др.), и эксплуатационные, возникающие после некоторой наработки изделия в результате усталости металла деталей, коррозии, изнашивания и т. д., а также неправильного технического обслуживания и эксплуатации.

2.2.1. Характеристики дефектов типа нарушения сплошности металла

Литейные дефекты. Горячие трещины – обычно хорошо видимые разрывы поверхности отливки, распространяющиеся по границам кристаллов и имеющие неровную окисленную поверхность. Образуются вследствие усадки при застывании расплава в формах. Характерными признаками горячих трещин являются их неровные (рваные) края и значительная ширина.

Холодные трещины – очень тонкие разрывы поверхности отливки, имеющие обычно чистую, светлую или с цветами побежалости зернистую поверхность. Образуются из-за внутренних напряжений или механического воздействия при температуре ниже температуры свечения отливки.

Термические трещины – обычно хорошо видимые глубокие разрывы поверхности отливки. Поверхность излома раскрытой трещины – мелкозернистая окисленная или с цветами побежалости. Обнаруживаются эти трещины в отливках после термической обработки.

Газовые раковины – закрытые или открытые полости округлой формы с чистой и гладкой, иногда окисленной поверхностью, находящиеся в теле отливки. Образуются при затвердевании металла вокруг пузырьков газа.

Усадочные раковины – открытые или закрытые – сравнительно большие полости произвольной формы с грубой шероховатой, иногда окисленной поверхностью отливки.

Рыхлота – местное скопление мелких усадочных раковин при крупнозернистой структуре металла.

Пористость – местное скопление мелких газовых или усадочных раковин.

Песчаная раковина – полость в теле отливки, полностью или частично заполненная формовочным материалом.

Шлаковая раковина – полость, заполненная шлаком.

Дефекты прокатанного и ковального металла

Рванины – представляют собой разрывы или надрывы металла разнообразного очертания с рваными краями. Чаще расположены на кромках листов, профилей.

Волосовины – мелкие внутренние или выходящие на поверхность трещины, образовавшиеся из газовых пузырей или неметаллических включений при прокатке или ковке.

Расслоения – нарушения сплошности внутри прокатанного металла, представляющие собой раскатанные крупные дефекты слитка (глубокие усадочные раковины, усадочная пористость, скопления пузырей или неметаллических включений).

Внутренние разрывы – сравнительно крупные нарушения сплошности внутренней части заготовки, периодически повторяющиеся по ее длине.

Трещины бывают одиночные и групповые, расположенные беспорядочно или идущие в определенном направлении. По длине они достигают нескольких метров; глубина трещин в зависимости от размеров проката, причин и условий возникновения дефекта – до 10–15 мм.

Дефекты, возникающие при различных видах соединения деталей. Трещины в зоне сварного шва

Надрывы – неглубокие трещины, возникающие в деталях в результате холодной деформации металла, например, при сверлении или развертке отверстий тупым сверлом или разверткой, накатке резьбы, изготовлении пружин, холодной штамповке, особенно когда материал имеет недостаточно высокие пластические свойства из-за дефектов структуры.

2.2.2. Дефекты, возникающие в деталях при эксплуатации машин

Трещины усталости являются наиболее распространенными эксплуатационными дефектами, Основная причина усталостных разрушений деталей – действие высоких переменных напряжений.

Трещины усталости различаются по внешнему виду. Чаще всего они бывают двух типов:

- а) поперечные или кольцевые трещины, развивающиеся на цилиндрических деталях по окружности в сечении, перпендикулярном к оси детали;
- б) трещины, расположенные под углом к оси детали.

Коррозионные поражения (очаговые, межкристаллитные и др.) встречаются на различных деталях. Степень коррозионного поражения зависит от наличия агрессивных сред, качества защитных покрытий, неблагоприятного сочетания материалов деталей в узле и др.

Трещины ползучести распространяются по границам зерен, встречаются на деталях из жаропрочных материалов и других сплавов, работающих при высоких температурах.

Термические трещины возникают при резких сменах температуры, а также при недостаточной смазке или при заедании (схватывании) поверхностей трущихся деталей, в результате чего поверхности последних нагреваются до высоких температур.

Механические повреждения поверхности – забоины, вмятины, надиры, риски, местный наклеп; причины их могут быть самыми различными.

2.3. Общие требования к средствам дефектоскопического контроля

К средствам дефектоскопического контроля относятся дефектоскопы и дефектоскопические материалы (проникающие и флуоресцирующие жидкости, проявляющие краски, магнитные порошки, суспензии и др.), вспомогательные приборы (рентгеноэкспонетры, приборы контроля концентрации суспензии и степени размагниченности деталей, вискозиметры и др.), необходимые приспособления (контрольные образцы, фиксирующие и сканирующие устройства, стойки, тубусы, компенсаторы и др.).

Дефектоскопы (стационарные, передвижные, переносные) по своему назначению подразделяются на универсальные и специализированные, а последние, в свою очередь, – на неавтоматизированные дефектоскопы и автоматизированные комплексные системы контроля. Универсальные дефектоскопы предназначены для контроля различных по форме и размерам деталей и узлов, а специализированные – для контроля однотипных деталей.

Дефектоскопические средства должны удовлетворять общим техническим требованиям Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации. Основными из них являются: соблюдение принципов агрегатного построения приборных комплексов, унификации и стандартизации приборов и устройств. Дефектоскопы должны быть разработаны по блочному методу на основе единой конструктивной технологической базы с использованием стандартных элементов, деталей, узлов и агрегатов.

Для обеспечения возможности включения дефектоскопов в автоматизированные системы (линии) контроля они должны обладать высокой производительностью и информационной совместимостью с другими агрегатными комплексами и работать с нормализованными входными и выходными сигналами.

При разработке дефектоскопов также должны учитываться требования метрологического обеспечения по таким параметрам, как погрешность и выявляемость дефектов.

В технических требованиях на создание дефектоскопических средств должны быть определены следующие общие показатели: области, место и условия применения, производительность, чувствительность, время установления рабочего режима, время непрерывной работы, потребные ток или мощность, среднее время безотказной работы, гарантийный срок, габаритные установочные размеры, масса и конструктивные особенности исполнения.

2.4. Механизация и автоматизация неразрушающего контроля

В связи с высоким техническим уровнем современного производства к методам и средствам НК предъявляют высокие требования по быстродействию, механизации и автоматизации контрольных операций, как при изготовлении, так и в эксплуатации изделий.

Средства НК, используемые при изготовлении изделий, можно подразделить на три группы:

- средства неавтоматического контроля;
- автоматы и автоматические системы контроля;
- средства НК автоматических систем управления технологическими процессами (АСУТП).

Средства неавтоматического контроля предназначены для получения информации об одном или немногих параметрах, характеризующих качество заготовки, полуфабриката, детали, узла или агрегата. Эти средства применяются для ручного контроля, из-за чего их производительность относительно низкая. Для повышения производительности и сокращения трудоемкости контроля большое значение имеет механизация и автоматизация контрольных операций.

В автоматах и автоматических системах (линиях) контроля могут одновременно использоваться несколько методов НК, обеспечивающих получение информации о параметрах, всесторонне характеризующих качество контролируемого объекта. В состав этих систем контроля входят автоматические транспортирующие, сканирующие и сортирующие устройства, комплекс аппаратуры НК, дефектоотметчики, индикаторы и регистраторы различных видов. Основным назначением таких систем является разбраковка контролируемых объектов по принципу «годно–брак» или рассортировка по одному или нескольким параметрам.

Средства НК, используемые в АСУТП, предназначены для выдачи такой информации, которая может быть использована для автоматического управления технологическими процессами, например, сваркой, склеиванием и др. В состав систем АСУТП, кроме средств автоматических линий контроля, входят также специализированные средства вычислительной техники и автоматики для формирования управляющих воздействий.

Средства НК, используемые для контроля условиях эксплуатации машин, летательных аппаратов, энергетических блоков и других дорогостоящих или требующих обеспечения высокой надежности объектов, можно подразделить на системы встроенного автоматизированного контроля и автономные.

Системы встроенного автоматизированного контроля включают в себя: датчики для получения информации о неисправностях агрегатов или нарушениях сплошности материала ответственных деталей (узлов), аппаратуру обработки и индикации этой информации. Контроль осуществляется путем «опроса» датчиков с помощью бортовых регистраторов или подключения к ним наземного регистрирующего оборудования при проведении профилактических работ.

2.5. Общие требования к контролерам-дефектоскопистам

Высокая эффективность НК обеспечивается не только правильно выбранными методами, современными средствами, методиками и технологией контроля, но также высокой профессиональной подготовкой дефектоскопистов (операторов-контролеров).

В настоящее время НК деталей на производстве большей частью является ручным. Поэтому роль дефектоскопистов при контроле очень велика. В их функции входит настройка дефектоскопов, тщательное выполнение предусмотренных методикой операций контроля, оценка показаний индикаторов (регистраторов) и принятие решения по выявленным дефектам. Чтобы снизить влияние субъективных факторов на результаты контроля, к дефектоскопистам предъявляют следующие требования:

- они должны пройти подготовку по методам и средствам НК и технике безопасности в объеме типовой программы и требований к дефектоскопистам по каждому из методов контроля, изложенным в «Едином тарифно-квалификационном справочнике работ и профессий рабочих»;
- у них должна быть дополнительная специальная подготовка – общетеоретическая подготовка по технологии производства, конструкции и основам эксплуатации машин, детали и узлы которых контролируются;
- у них должен быть практический опыт по настройке, проверке и применению дефектоскопов, они должны хорошо знать частные методики контроля деталей, уметь распознавать и определять ложные сигналы, правильно выбирать дублирующий (арбитражный) метод при затруднениях в оценке результатов контроля.

2.6. Технические возможности методов дефектоскопического контроля

Важнейшими характеристиками технических возможностей методов контроля являются: чувствительность и разрешающая способность метода, достоверность результатов контроля, надежность аппаратуры и простота технологического процесса контроля, производительность контроля, требования по технике безопасности и требования к квалификации специалистов по проведению контроля.

Чувствительность метода определяется наименьшими размерами выявляемых дефектов;

- у поверхностных – шириной раскрытия у выхода на поверхность, протяженностью вглубь металла и по поверхности детали;
- у глубинных – размерами дефекта с указанием глубины залегания.

Чувствительность зависит в основном от особенностей метода НК, технических данных применяемой аппаратуры и дефектоскопических материалов, чистоты обработки поверхности контролируемой детали, ее материала, условий контроля и других факторов. Сравнительные данные по чувствительности некоторых методов НК приведены в таблице 2.1.

Для обеспечения технически достижимой или целесообразной чувствительности настройку дефектоскопов по этому параметру производят по контрольным образцам в соответствии с действующими критериями на отбраковку конкретной детали.

Таблица 2.1 – Чувствительность методов НК

Метод НК	Минимальные размеры обнаруживаемых поверхностных трещин, мм		
	ширина раскрытия	глубина	протяженность
Визуально-оптический	0,005–0,01		0.1
Цветной (с применением составов «К» и «М»)	0,001–0,002	0.01–0.03	0.1–0.3
Люминесцентно-красочный	0,001–0.002	0,01–0.03	0,1–0,3
Люминесцентно-порошковый	0.01–0,03	0.1–0.3	2–3
Магнитопорошковый	0.001	0.01–0.05	0.3
Токовихревой	0,0005–0,001	0.15–0.2	0.6–2
Ультразвуковой импульсный эхо-метод	0.001–0,03	0,1–0,3	—
Рентгенографический	—	1.5–3 % от толщины	—
У-графический	—	4–0 % от толщины	—

Разрешающая способность дефектоскопа определяется наименьшим расстоянием между двумя соседними минимальными выявляемыми дефектами, для которых возможна их отдельная регистрация. Измеряется она в единицах длины или числом линий на 1 мм. Предусматривается в ТУ на оптические приборы и радиационные дефектоскопы; для ультразвуковых и токовихревых дефектоскопов может оговариваться лишь при необходимости; для магнитных – не указывается.

Достоверность результатов дефектоскопического контроля определяется вероятностью пропуска деталей с явными дефектами или необоснованной браковкой годных деталей. При проверке дефектоскопа на достоверность результатов контроля ответственной продукции обращают особое внимание на случаи обнаружения дефектов.

В таблице 2.2 сравниваются особенности и области применения методов дефектоскопического контроля.

Требования по технике безопасности при применении различных методов значительно отличаются. Магнитный, ультразвуковой и токовихревой контроль не требуют специальных мер защиты. При капиллярном контроле необходима защита от жидкостей паров и органических растворителей, а также ультрафиолетового облучения, и при радиационном – от воздействия ионизирующих излучений и образующихся в воздухе вредных для организма человека газов – озона и окислов азота.

Таблица 2.2 – Характерные особенности и области применения распространенных методов НК

Метод НК	Дефекты	Область применения	Преимущества	Недостатки
1	2	3	4	5
Метод Визуально-оптический	Относительно крупные трещины механические и коррозионные повреждения поверхности, нарушения сплошности защитных покрытий, остаточные деформации, изменения характера неразъемных соединений, течь следы износа и др.	Осмотр деталей и узлов как снятых, так и непосредственно в конструкции	Возможность осмотра больших поверхностей деталей из различных материалов, имеющих разную форму. Возможность проведения эффективного контроля в труднодоступных местах конструкции (на наличие относительно крупных дефектов)	1. Низкая вероятность обнаружения мелких поверхностных дефектов. 2. Зависимость выявляемости дефектов от субъективных факторов (острота зрения, усталость оператора, опыт работы) и условий контроля (освещенность, оптический контраст и др.)
Цветной (с применением составов «К» и «М»)	Поверхностные открытые трещины, поры и коррозионные поражения	Контроль деталей, и узлов в основном из немагнитных материалов	1. Возможность контроля деталей, различных по размерам и форме. 2. Высокая чувствительность метода и достоверность результатов контроля. 3. Простота технологии контроля. 4. Наглядность и документальность результатов контроля	1. Необходимость удаления с контролируемой поверхности защитных покрытий, смазок, окалины и других загрязнений. 2. Относительно высокая трудоемкость ручного контроля. 3. Большая длительность процесса контроля (0,5–1,5 ч)

1	2	3	4	5
Люминесцентно-красочный	Поверхностные открытые трещины, поры и коррозионные поражения	Контроль деталей и узлов в основном из немагнитных материалов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность контроля деталей, различных по размерам и форме. 2. Высокая чувствительность. 3. Простота методики контроля. 4. Наглядность результатов контроля. 5. Возможность механизации и автоматизации операций контроля 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Необходимость удаления с поверхности деталей защитных покрытий, смазок, окислы и других загрязнений. 2. Пониженная по сравнению с цветным красочным методом достоверность результатов контроля. 3. Относительно большая длительность процесса контроля. 4. Коррозионная активность некоторых составов по отношению к алюминиевым, магниевым сплавам и сталям. 5. Необходимость высокой чистоты обработки поверхности – не менее $\Delta 6$
Рентгенографический	Внутренние скрытые дефекты, дефекты закрытых деталей	Контроль полуфабрикатов, деталей, узлов агрегатов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Возможность контроля деталей различной формы. Большая интенсивность излучения и возможность регулирования его энергии. 2. Документальность результатов контроля 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Громоздкость и сложность рентгеновской аппаратуры. 2. Относительно низкая чувствительность к усталостным трещинам. 3. Недостаточная технологическая маневренность при просвечивании в полевых условиях и в условиях монтажа конструкции. 4. Относительно низкая производительность и более высокая стоимость контроля на внутренних дефекты. 5. Необходимость устройства защиты работающих от рентгеновского излучения
У-графический	Внутренние скрытые дефекты, дефекты закрытых деталей	Контроль полуфабрикатов, деталей, узлов агрегатов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Автономность, портативность и маневренность у дефектоскопов. 2. Документальность результатов контроля 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ограниченная интенсивность излучения и невозможность регулирования его энергии. Необходимость набора изотопов. 2. Более низкая чувствительность по сравнению с рентгенографическим методом. 3. Изменение интенсивности излучения при изменяемых источниках с течением времени

2.7. Рекомендации по выбору методов неразрушающего контроля

Для выбора метода или комплекса методов НК должны быть определены: вид дефектов, подлежащих выявлению, объекты (зоны) контроля, их характеристики и условия контроля, а также должны быть заданы критерии отбраковки. По этим данным, руководствуясь данными таблицы 2.3, определяют возможные методы, позволяющие решить поставленную задачу. Затем, принимая во внимание критерии на отбраковку, чувствительность и специфику методов, выбирают методы и средства НК для применения. При равной чувствительности предпочтение отдается тому методу, который проще и доступнее в конкретных условиях применения, у которого выше достоверность результатов контроля и производительность.

Таблица 2.3 – Рекомендации по выбору методов НК

Дефекты, объекты контроля, их характеристики и условия контроля	Применимость методов дефектоскопии					
	Магнито-порошковый	Капиллярный	Токовыхревой (накладные датчики)	Ультразвуковойимпульс- ный эхо-метод (в кон- тактном варианте)	Акустический импедансный	Рентгенографический и У-контроль
1	2	3	4	5	6	7
Дефекты производственного происхождения						
В полуфабрикатах:						
а) поковках, штамповках и профилях:						
закаты, заковы	+	±	±	+	-	-
включения	±	±	-	+	-	±
расслоения, внутренние трещины	-	-	-	+	-	±
трещины, рванины, выходящие на поверхность	+	+	±	+	-	-
флокены	+	-	+	+	-	-
б) трубах, полосах, прутках и проволоках:						
трещины	+	+	+	+	-	±
волосовины	+	+	+	+	-	-
надрывы	+	+	-	+	-	±
включения	±	±	-	+	-	-
В деталях, изготовленных или отремонтированных с применением различных видов обработки, и соединениях						
а) при сварке:						
трещины	+	+	+	+	-	±
непровары	+	-	-	+	-	+
шлаковые включения	-	-	-	+	-	+
раковины, пористость	-	±	-	±	-	+

Продолжение таблицы 2.3

1	2	3	4	5	6	7
подрезы	-	-	-	-	-	+
б) при пайке и склеивании:						
трещины	-	±	-	±	+	+
непропаи	-	±	-	±	±	+
непроклеи	-	-	-	-	+	-
пористость	-	-	-	+	-	+
в) при механической обработке:						
шлифовочные трещины	+	+	±	±	-	-
трещины, возникшие в результате холодной правки	+	+	+	+	-	+
надрывы	+	+	-	-	-	-
прижоги	±	-	±	±	-	-
разностенность и подрезы	-	-	-	-	-	+
г) при термической обработке:						
закалочные трещины	+	+	+	+	-	±
несоответствие структуры (твердости)	-	-	±	-	-	-
несоответствие толщины упрочненного слоя (цементированного, азотированного, поверхностно-закаленного, наклепанного, алитированного и др.)	-	-	±	+	-	-
д) при литье:						
раковины, пористость	-	±	-	+	-	+
трещины (поверхностные)	+	+	+	+	-	±
разностенность	-	-	-	-	-	+
ликвация	-	-	-	+	-	+
спаи	+	±	±	+	-	-
включения	±	-	-	+	-	+
Дефекты, возникающие при эксплуатации						
Трещины усталости и другие открытые трещины	+	+	+	+	-	±
Точечные коррозионные и коррозионно-эрозионные поражения	-	+	-	±	-	+
Механические повреждения поверхности (забоины, вмятины, надиры, риски, местный наклеп и др.)	-	-	-	±	-	-
Растрескивание и межкристаллитная коррозия	-	+	±	+	-	±
Деформация и разрушение закрытых деталей	-	-	-	±	-	+
Дефекты сборки и монтажа, нарушения сочленения деталей друг с другом в закрытых узлах и агрегатах	-	-	-	-	-	+
Трещины и коррозионные поражения в закрытых местах	-	-	-	±	-	±
Зоны и условия контроля						
Контроль всей поверхности	+	+	±	±	±	+

1	2	3	4	5	6	7
Местный контроль (отдельных зон)	+	+	+	+	+	+
Снятые детали	+	+	+	+	+	+
Неснятые детали (контроль в конструкции):						
При доступе с двух сторон	+	+	+	+	+	+
При доступе с одной стороны (дефект с противоположной)	-	-	±	+	+	-
При ограниченных подходах (в труднодоступных местах)	-	-	±	±	-	±
При отсутствии подходов (закрытые детали)	-	-	-	±	-	+
Чистота обработки поверхности						
Детали с чистотой обработки поверхности более √5	+	+	+	+	+	+
Детали с чистотой обработки √4 и менее	±	±	±	±	±	+
Место расположения дефектов						
Поверхностные	+	+	+	±	-	+
Подповерхностные (на глубине до 0,3–1 мм)	±	-	±	±	±	+
Внутренние (глубинные) дефекты	-	-	-	±	±	+
Дефекты, расположенные в ослабленных местах детали (галтелях, пазах, отверстиях, на острых кромках и т. д.)	+	+	+	±	-	+
Физические свойства материала контролируемых объектов						
Ферромагнитные детали	+	+	±	+	+	+
Детали из немагнитных материалов с мелкозернистой структурой	-	+	+	+	+	+
Детали из немагнитных материалов с крупнозернистой структурой	-	+	+	±	+	+
Детали из неметаллов	-	±	-	+	+	+
Форма и размеры контролируемых объектов						
Деталь или контролируемая зона простой формы (одинакового сечения)	+	+	+	+	+	+
Деталь сложной формы (с различной кризической в зоне контроля)	+	+	±	±	-	+
Крупногабаритные и массивные детали	+	+	+	+	+	±
Микродетали (миниатюрные изделия)	-	±	±	-	-	±
Детали толщиной более 1 мм	+	±	+	+	+	+
Детали толщиной менее 1 мм	+	+	+	±	-	±
П р и м е ч а н и е: «+» – широкое применение метода; «±» – ограниченное применение метода; «-» – метод неприменим.						

3. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

3.1. Области применения и сущность визуально-оптического контроля. Требования к оптическим приборам

Задачи, решаемые визуально-оптическим контролем: глаз человека является основным контрольным прибором в дефектоскопических производственных процессах. Глазом контролируют: исходные материалы, полуфабрикаты и готовую продукцию; обнаруживают отклонения формы деталей и изделий, изъяны материала и обработки поверхности и другие дефекты, возникающие в процессе производства и при эксплуатации механизмов и машин: остаточную деформацию, поверхностную пористость, крупные трещины, подрезы, риски, надиры, эрозионные и коррозионные поражения, следы наклепа и др. Визуально определяют состояние защитных покрытий, контролируют качество изделий по их цвету и осуществляют другие контрольные функции.

Однако возможности глаза ограничены, например, при осмотре удаленных объектов, предметов, находящихся в условиях малой освещенности, а также быстро перемещающихся объектов. При осмотре предметов, находящихся в покое на расстоянии наилучшего зрения при нормальной освещенности, человек испытывает трудности из-за ограниченной разрешающей способности и контрастной чувствительности зрения.

Оптические приборы позволяют намного расширить пределы естественных возможностей глаза. Вследствие преломления лучей в оптической системе приборов увеличивается угловой размер рассматриваемого объекта. Острота зрения и разрешающая способность глаза увеличиваются примерно во столько раз, во сколько увеличивает оптический прибор. Это позволяет видеть мелкие объекты, размеры которых находятся за пределами границы видимости невооруженного глаза.

Оптические приборы-эндоскопы позволяют осматривать детали и поверхности элементов конструкций, скрытые близлежащими деталями и недоступные прямому наблюдению, контролировать состояние внутренней поверхности различных закрытых конструкций.

Визуальный контроль с применением оптических приборов называют визуально-оптическим. Он предназначен для обнаружения различных поверхностных дефектов материала деталей, скрытых дефектов агрегатов, контроля закрытых конструкций, труднодоступных мест механизмов и машин (при наличии каналов для доступа приборов к контролируемым объектам). Контроль проводится путем наблюдения деталей и изделий в видимом свете. При контроле используются

оптические приборы, создающие полное изображение проверяемой зоны, ее видимую картину.

Визуально-оптический контроль так же, как и визуальный осмотр – наиболее доступный и простой метод обнаружения поверхностных дефектов деталей. Оптические средства контроля используют на различных стадиях изготовления изделий, деталей и конструкций, в процессе регламентных работ и осмотров, проводимых при эксплуатации техники, а также при ее ремонте.

Простота контроля, несложное оборудование, сравнительно малая трудоемкость – основные преимущества этого метода.

Однако у визуально-оптического контроля недостаточно высокая достоверность и чувствительность. Поэтому такой способ контроля применяют в следующих случаях: для поиска поверхностных дефектов (трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, язв, открытых раковин, пор и др.), при визуально-оптическом контроле деталей – доступных для непосредственного осмотра, а также более мелких трещин (по сравнению с трещинами, выявляемыми невооруженным глазом).

3.1.1. Классификация оптических приборов для визуально-оптического контроля

По виду приемника лучистой энергии различают три группы оптических приборов: визуальные, детекторные и комбинированные (рисунок 3.1).

У визуальных приборов приемник – глаз. К визуальным относятся обзорные (наблюдательные) приборы, эндоскопы, микроскопы и лупы, а также приборы для измерения линейных и угловых размеров и других величин.

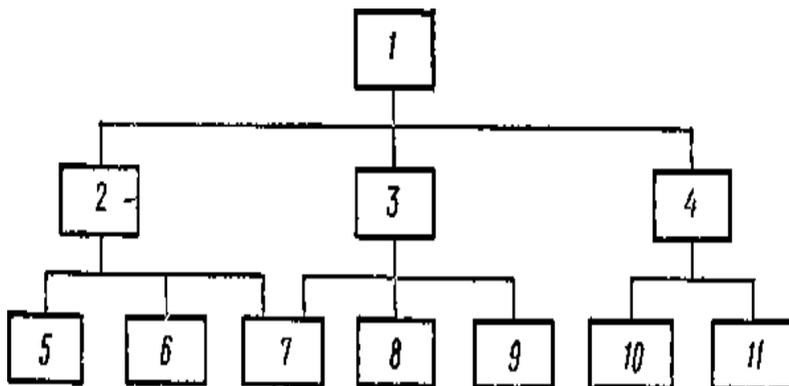


Рисунок 3.1 – Классификация оптических приборов для визуально-оптического контроля: 1 – оптические приборы для визуально-оптического контроля; 2 – приборы для контроля близко расположенных объектов ($Z < 250$ мм); 3 – приборы для контроля удаленных объектов ($Z > 250$ мм); 4 – приборы для контроля скрытых объектов (эндоскопы); 5 – лупы; 6 – микроскопы; 7 – телескопические лупы; 8 – бинокли; 9 – зрительные трубы; 10 – гибкие эндоскопы; 11 – жесткие эндоскопы

К детекторным относятся приборы, в которых приемником лучистой энергии служат различные детекторы: химические реагенты (фотоэмульсии), люминесцирующие вещества, электронные приборы (спектрофотометры).

Комбинированные приборы пригодны для обзора объектов визуально и с помощью детектора. Некоторые из них представляют собой сложный комплекс, в который, кроме оптических систем, входят различные электрические (электронные) устройства и механизмы.

Для визуально-оптического контроля в основном применяют визуальные приборы.

Визуальные оптические приборы, используемые при НК для поиска дефектов в деталях и конструкциях, по назначению разделяют на три группы (рисунок 3.1):

1) приборы для контроля мелких близко расположенных объектов, т. е. деталей и изделий, расположенных от глаза контролера в пределах расстояния наилучшего зрения – 250) мм (лупы, микроскопы);

2) приборы для контроля удаленных объектов, т. е. расположенных далее 250 мм (телескопические лупы, зрительные трубы, бинокли);

3) приборы для контроля скрытых объектов – внутренних поверхностей отверстий, полых деталей и конструкций (эндоскопы, бороскопы, перископические дефектоскопы и др.).

3.1.2. Общие требования к приборам для визуально-оптического контроля

Условия эксплуатации приборов для визуально-оптического контроля в зависимости от назначений весьма разнообразны. Приборы цехового назначения, как кривило, применяются при постоянной температуре (+15, + 20 °С), при постоянном атмосферном давлении, невысокой и мало изменяющейся влажности, при относительно постоянных механических нагрузках.

Конструкция оптических приборов должна обеспечивать полную работоспособность и заданный предел разрешения при всех условиях эксплуатации, включая температурные колебания. В приборах должны быть предусмотрены устройства для уменьшения отрицательного влияния рассеянного света (бленды, диафрагмы, деталей), а также для устойчивого и прочного крепления деталей и узлов. Полости многоэлементных приборов должны иметь достаточную герметизацию. Для изготовления приборов, применяемых в полевых условиях, необходимо использовать коррозионно-стойкие материалы и атмосферостойкие защитные покрытия.

Удобство оптических приборов в эксплуатации достигается: удобным расположением окуляров, применением наглазников (налобников), защищающих глаза от попадания постороннего света и снижающих утомление глаз; применением биноклярных насадок, что также повышает разрешающую способность зрения и снижает утомляемость; удобным расположением и формой рукояток управления и четкой

фиксацией их в нужных положениях; возможностью легкой замены быстроизнашивающихся частей), малой массой и удобством переноски прибора, возможностью его быстрого перевода из транспортного в рабочее положение и обратно.

Большое значение имеет внешний вид и форма прибора, особенно эндоскопа. Он не должен иметь выступающих элементов и резких переходов в сечении погружаемой части, затрудняющих его ввод в проверяемый механизм и вывод оттуда.

3.2. Назначение, типы, технические характеристики и конструктивные особенности жестких эндоскопов

Для осмотра внутренней поверхности относительно коротких полых деталей и закрытых конструкций применяют эндоскопы, в конструкции которых использованы литические трубки приборов специального назначения (цистоскопов, бронхоскопов и др.).

Цистоскопы можно применять для осмотра полостей диаметром более 8 мм, глубиной до 200 мм при увеличении 1,1–1,8. Оптическая трубка цистоскопа представляет собой тонкую трубку, внутри которой размещена оптическая система. Цистоскоп М.54В имеет устройство для изменения положения объектива и направления осмотра, что позволяет использовать его для осмотра под различными углами внутренних поверхностей полостей сложной формы.

Техноэндоскопы предназначены для осмотра полостей глубиной до 500 мм. Бронхоскоп М.494 позволяет проводить прямое наблюдение глубоких полостей (угол зрения прибора составляет от 162 до 180°). Бронхоскоп М.451 обеспечивает осмотр объектов с изменяемым углом наблюдения от 45 до 115°; техноэндоскоп имеет боковое направление осмотра.

Перископический дефектоскоп ПД-60 предназначен для осмотра внутренних поверхностей полостей диаметром более 35 мм, глубиной до 900 мм при увеличении 4*. В его конструкции использована телескопическая зрительная трубка с объективом и подвижным окуляром и прямоугольная оптическая призма, изменяющая направление лучей на 90°. Дефектоскоп снабжен осветителем, который помещен в общем с призмой корпусе. Питание осветителя – от источника тока напряжением 26 В.

Перископический дефектоскоп коленчатый ПДК-60 – многоцелевой прибор; используется в тех случаях, когда из-за сложных подходов объект невозможно контролировать другими приборами. Он имеет два колена, изменяющих ход лучей на 90° (или 75°). Объективная часть прибора имеет переменную длину; в средней его части установлена подвижная оборачивающая система, перемещением которой вдоль оптической трубы проводят наводку на резкость.

Оптическая система дефектоскопа ПДК-60 обеспечивает увеличение от 0,5 до 2,5*, в зависимости от длины объективной части и расстояния до осматриваемого объекта. Поле зрения прибора – от 45 до 110 мм.

Приборы типа РВП предназначены для осмотра при увеличении до 15* прямых участков труб, полых валов, камер, протяженных закрытых конструкций и других подобных изделий диаметром от 9 до 870 мм, длиной до 16,5 м.

Оптическая схема приборов состоит из сменных объективов, окуляров и оборачивающих систем. Приборы РВП-467, РВП-469 и РВП-478 выполнены в виде неразъемных труб, внутри которых расположена оборачивающая система. На одном конце трубы установлен объектив и осветитель, на другом – окуляр. В конструкции сборно-разборных приборов предусмотрены промежуточные трубы длиной от 0,7 до 3,3 м, внутри которых размещаются оборачивающие системы. Это позволяет собирать прибор необходимой длины в зависимости от размеров (протяженности) осматриваемых конструкций.

Прибор РВП-473 снабжен дополнительным устройством для проецирования изображения контролируемой поверхности на фотокатод телевизионной трубки, что позволяет применять прибор не только для осмотра глазом, но также для наблюдения с помощью телевизионной установки.

3.3. Назначение, типы, технические характеристики и конструктивные особенности гибких жгутов и эндоскопов

Гибкие телескопические приборы включают в себя наборы оптических (стеклянных) волокон. К ним относятся волокна, имеющие световедущую жилу из прозрачного материала с высоким показателем преломления и оболочку из материала с меньшим показателем преломления. Лучи света, падающие на один торец такого волокна, благодаря полному внутреннему отражению на поверхности раздела жилы и оболочки будут распространяться вдоль волокна до противоположного торца.

В светофокусирующих волокнах показатель преломления материала изменяется вдоль радиуса волокна не скачком, а непрерывно по параболическому закону. В таких волокнах потери света уменьшены благодаря отсутствию потерь при каждом отражении от поверхности раздела двух сред – жилы и оболочки. Луч света, падающий на торец волокна, движется вдоль него по некоторой синусоидальной кривой.

Для уменьшения потерь света из-за его выхода через боковую поверхность волокна, а также для повышения контраста изображения, некоторые типы волокон покрывают металлической оболочкой из свинца, алюминия или индия.

Из оптических волокон составляют жгуты, на торцах которых волокна скрепляют методом горячего прессования или склеивают.

Жгуты для передачи изображения представляют собой снопы волокон с регулярным и идентичным расположением световедущих жил на обоих торцах жгута. Каждое волокно несет один элемент изображения. На выходном торце изображение, переданное жгутом, получается мозаичным.

Коэффициент светопропускания жгута длиной 500–1500 мм для направленного белого света (угол расхождения лучей около 5°) составляет 25–52 %.

Светопропускание лимитируется дискретной структурой волоконных элементов, светопоглощением исходных материалов и геометрией оптических волокон.

Разрешающая способность жгутов длиной более 1 м составляет около 12–15·1/мм, коротких – около 20·1/мм. Максимальная разрешающая способность длинных световодов из тонких волокон не превышает 40–45·1/мм. Повышение разрешающей способности сопровождается снижением коэффициента светопропускания, увеличением степени неравномерности его по полю изображения, уменьшением апертуры и снижением контраста изображения.

Гибкие осветительные жгуты типа ГОЖВ собирают из оптических волокон диаметром 20–50 мкм.

Основные размеры гибких осветительных жгутов волокон приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристика ГОЖВ

Световой диаметр жгута волокон, мм	Максимальный внешний диаметр жгута, мм			Длина жгута, мм		
	ГОЖВ-А	ГОЖВ-Б	ГОЖВ-В	ГОЖВ-А	ГОЖВ-Б	ГОЖВ-В
2	5	4	5,5	100; 350;	250; 500; 750; 1000; 1500	250; 500; 750; 1000; 1500
3	7	5	7,5	500; 750; 1000J 1500		
5	9	7	9,0	250; 500;		
8	12	10	11,5	750; 1000;		
10	16	Н	14,5	1500	500; 750; 1000; 1500	500; 750; 1000; 1500
15	20	18	19	500; 750;		
20	28	25	24	1000; 1500		
25	32	30	31	500; 750;	750; 1000; 1500	750; 1000; 1500
30	40	35	37	1000		

В конструкции каждого гибкого эндоскопа имеется регулярный жгут волокон для передачи изображения (с диаметром волокна 12–17 мкм или более) и осветительный жгут нерегулярной укладки. На концах регулярного жгута устанавливаются объектив и окуляр. Источником света служит осветитель, выполненный в виде отдельного блока с мощными лампами. С помощью рукоятки, расположенной около окуляра, объективная часть эндоскопа может изгибаться в одной плоскости на угол $\pm 120^\circ$. Прибор заключен в защитную оболочку из полихлорвинила или металлорукава. Характеристики эндоскопов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Основные характеристики гибких эндоскопов серии ЭТГ и других моделей

Параметр	Модель							
	ЭТГ	ЭТА	ЭТАлж	ЭТЖ	ЭТВЦ	ЭТВЦ-Т	ЭТВЦ-М	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Диаметр рабочей части	4; 6; 8; 10 мм	4; 6; 8; 10 мм	4; 6; 8 мм	1,4, 1,7, 5,5, 6,5, 8,5 мм	6; 8; 10; 12 мм	6; 8; 10; 12 мм	6; 8; 10; 12 мм	
Длина рабочей части	0,5; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0; 2,5 м	0,5; 1,2; 1,5; 2,0 м	0,45; 0,6; 0,8 м	От 20 до 1000 мм	500–3000 мм	500–3000 мм	500–3000 мм	
Угол поворота дистального	±180°	До ±180°	±180° и 120° (для диаметра 4 мм)	-	±180° (±120°) в одной плоскости	±180° (±120°) в одной плоскости	±180° (±120°) в одной плоскости	
Угол поля зрения объектива	60°	60°	50–60°	60°	-	-	-	
Рабочее расстояние	От 15 мм	От 15 мм	От 15 мм	От 10 мм	От 1,88 мм	15–100 мм	15–100 мм	
Увеличение на рабочем расстоянии 15 мм	Не менее 1,7 крат	Не менее 1,7 крат	Не менее 1,7 крат	-	-	-	-	
Диоптрийная регулировка окуляра	±4 диоптр	±4 диоптр	±4 диоптр	±4 диоптр	-	-	-	
Исполнение рабочей части	Гибкий	Гибкий / полужесткий	Полужесткий	Жесткий	Гибкий / полужесткий	Гибкий / полужесткий	Гибкий / полужесткий / жесткий	
Разрешающая способность на рабочем расстоянии 15 мм	Не менее 5 линий/мм	Не менее 5 линий/мм	Не менее 5 линий/мм	-	-	-	-	
Подсветка	Есть	Есть	Есть	Есть	Есть	Светодиодная	Светодиодная	
Разрешение камеры	-	-	-	-	656×496 пикс	640×480 пикс	640×480 пикс	

Диагональ монитора	-	-	-	-	-	5,0»	4»	5,6»
Разрешение монитора	-	-	-	-	960×234 пикс	960×234 пикс	960×234 пикс	960×234 пикс
Слот для карты памяти	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Нет	Есть	Есть
Масса, не более	0,8 кг	1,3 кг	1,3 кг	-	1 кг	0,7 кг	0,7 кг	0,7 кг
Диапазон рабочих температур	От -5°С до +45°С	От -5°С до +45°С	От -5°С до +45°С	От -5°С до +45°С	От -10°С до +45°С	От -10°С до +45°С	От -10°С до +45°С	От -10°С до +45°С
Источник питания	Аккумуляторный блок	4 х АА	4 х АА	-	Аккумулятор или сетевой адаптер			

3.4. Контроль изделий с применением оптико-электронных систем анализа изображения.

Классификация системы

В оптико-электронных системах контроля глаз заменяют фотоэлементы – различные электронные приборы, преобразующие световую энергию в электрическую на основе фотоэлектрического эффекта. В общем случае оптико-электронная система контроля состоит из устройств восприятия изображения (сканирующих устройств), устройств передачи изображения, логических схем анализа изображения и механизма разбраковки проверяемой продукции.

По принципам сканирования обзорно-поисковые сканирующие устройства разделяют на:

- *устройства поэлементного сканирования*, где сканирование контролируемого объекта осуществляется в любой последовательности по каждому элементу поля зрения; такие устройства позволяют проводить полный просмотр контролируемого поля и в случае необходимости воспроизводить полное изображение поля;
- *устройства последовательно-зонального сканирования*, где сканирование носит не дискретный, а непрерывный характер; к таким устройствам относятся, например, телевизионные системы, в которых развертка изображения осуществляется с помощью непрерывно перемещающегося электронного луча; устройства позволяют воспроизводить полное изображение сканируемого объекта;
- *устройства параллельно-зонального сканирования*, в которых сканирование осуществляется одновременно с помощью двух взаимно перпендикулярных щелей; каждая щель имеет свой светочувствительный элемент и свой канал передачи информации; устройства не позволяют воспроизводить полное изображение сканируемого объекта;
- *устройства зонально-поэлементного сканирования*, работающие в два этапа: сначала осуществляется сканирование по зонам до тех пор, пока не выяснится, и какой зоне находится дефект, затем выполняется поэлементное сканирование.

Указанные устройства не позволяют воспроизводить полное изображение сканируемого объекта.

По принципу действия сканирующие устройства бывают следующие:

- *Оптико-механические*, в которых используются подвижные сканирующие элементы отражательной и преломляющей оптики, – зеркальные элементы различной формы (плоские, сферические, параболические и др.), клинья, многогранные баранины, линзы, призмы и т. д. Эти элементы совершают вращательное, колебательное или возвратно-поступательное движение. Достоинством этих устройств является возможность использования чувствительных элементов со спектральной чувствительностью, диапазон которой – от инфракрасной до ультрафиолетовой области спектра. Недостатком этих устройств является

наличие подвижных механических систем, повышенная сложность, пониженная скорость сканирования и малая надежность при длительной эксплуатации.

- *Опτικο-электрические*, где воспринимающим элементом является один или несколько фотоприемников. Эти устройства просты, надежны, не боятся ускорений и вибраций и обеспечивают высокую четкость изображения. Разработаны электрические элементы, осуществляющие сканирование по изменяющейся траектории в зависимости от информации, получаемой от объекта контроля.
- *Полупроводниковые*, имеющие простую схему и несложное конструктивное исполнение. Эти устройства являются весьма перспективными.
- *Фотозлектронные вакуумные*, состоящие из передающих телевизионных трубок, специальных передающих трубок, трубок прямого видения и т. д. У этих устройств самая высокая чувствительность.
- *Волоконно-оптические*, позволяющие осуществить разделение изображения, изменение его формата. Они обеспечивают максимальное упрощение процесса сканирования и обработки результатов в счетно-решающих устройствах. При этом может быть достигнута намного большая разрешающая способность, чем в гибких волоконных эндоскопах (из-за снижения требований к светопропусканию).
- *Автоматический оптический контроль*. Для оптического контроля деталей и изделий (вместо визуально-оптического), а также для осмотра деталей при цветном, люминесцентном и магнитопорошковом контроле могут быть использованы сканирующие системы любого типа, в том числе воспроизводящие или не воспроизводящие изображение. Информация о состоянии объекта, его цвете, размерах, форме может быть выделена из видеосигнала и подвергнута различной обработке.

Системы автоматической обработки видеосигнала для НК разделяют на две группы:

- системы автоматического распознавания изображения, которые извлекают из изображения наиболее характерные признаки, позволяющие автоматически определить тип дефекта;
- измерители и счетчики, которые используются для автоматического определения размеров и координат дефектов, а также для их счета и разработки деталей по степени их повреждения.

Системы первого типа позволяют выделять на изображении деталей дефекты определенного (заданного) типа (трещины, поры и т. д.) и браковать детали по принципу «да-нет». Системы второго типа позволяют не только выделять дефекты, но и измерять их, определять координаты и по величине дефектов проводить разбраковку деталей на несколько заданных групп.

В обеих группах точность полученной информации определяется параметрами сканирующих датчиков, свойствами системы обработки информации и другими факторами. В качестве сканирующих датчиков применяются чаще всего видиконы, ортиконы, трубки бегущего луча и другие устройства. Различимость дефектов такими устройствами сравнима с различимостью человеческим глазом.

4. КАПИЛЛЯРНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

2.1. Классификация и области применения капиллярной дефектоскопии

Капиллярные методы неразрушающего контроля предназначены для обнаружения поверхностных дефектов типа несплошности материала, не видимых невооруженным глазом. Они основаны на использовании капиллярных свойств жидкостей. Этими методами выявляют дефекты путем образования индикаторных рисунков с высоким оптическим (яркостным и цветовым) контрастом и с шириной линий, превышающей ширину раскрытия дефектов.

При контроле на деталь наносят специальную смачивающую жидкость (проникающую жидкость, индикаторный пенетрант), которая под действием капиллярных сил заполняет полости поверхностных дефектов. Дефекты выявляют, обнаруживая либо жидкость, оставшуюся в их полостях после удаления ее с поверхности, либо скопления частиц порошка, взвешенного в жидкости и отфильтрованного на поверхности детали при заполнении полости дефекта жидкостью. В первом случае оставшуюся в полостях дефектов жидкость обнаруживают чаще после нанесения проявителя (рисунок 4.1). Он поглощает жидкость, образуя индикаторный рисунок, а также создает фон, улучшающий видимость рисунка. Во втором случае скопления порошка обнаруживают без применения проявляющего вещества.

Индикаторные рисунки, образующиеся при контроле, либо обладают способностью люминесцировать в ультрафиолетовых лучах, либо имеют окраску,

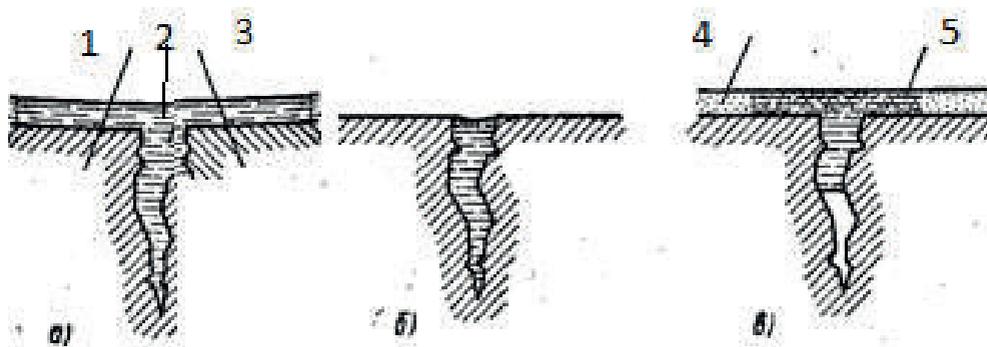


Рисунок 4.1 – Схема контроля деталей капиллярным методом с применением проявителя: *а* – полость трещины заполнена проникающей жидкостью; *б* – жидкость удалена с поверхности детали; *в* – нанесен проявитель, трещина выявлена; 1 – деталь; 2 – полость трещины; 3 – проникающая жидкость; 4 – проявитель; 5 – индикаторный рисунок трещины

вызываемую избирательным поглощением (отражением) части падающих на них световых лучей. Линии индикаторного рисунка имеют ширину от 0,05 до 0,3 мм (что на расстоянии наилучшего зрения – 250 мм соответствует угловой ширине от 15» до ГЗО») и яркостный контраст 30–60 % и более, а также высокий цветовой контраст. Это значительно выше соответствующих параметров поверхностных дефектов (угловой размер от 1 до 10», яркостный контраст 0–5 %, цветовой контраст отсутствует).

Поэтому рисунок обнаружить легче, чем сам дефект, и тем легче, чем шире индикаторная линия и выше ее контраст с фоном.

Наличие рисунка не только свидетельствует о существовании дефекта, но также указывает место его нахождения, форму или протяженность по поверхности детали.

Методы капиллярной дефектоскопии (КД), базирующиеся на описанных принципах, относят к основным методам дефектоскопии. Наряду с ними находят применение комбинированные методы КД, в которых используется сочетание двух и более различных по физической сущности методов контроля: капиллярного и некапиллярного (токовихревого, магнитопорошкового, радиационного и др.). Основные методы КД классифицируют по характеру индикаторного рисунка, по оптическим и геометрическим свойствам, определяющим его видимость. Комбинированные методы принято классифицировать в соответствии с некапиллярными методами дефектоскопии (рисунок 4.2, таблица 4.1).

Простейшим методом *яркостной капиллярной дефектоскопии (ЯКД)* является метод керосиновой или керосино-масляной пробы. В качестве проникающей жидкости используют керосин, невязкое масло или их смесь, а в качестве проявителя – мел, который применяют в виде сухого порошка, водной суспензии

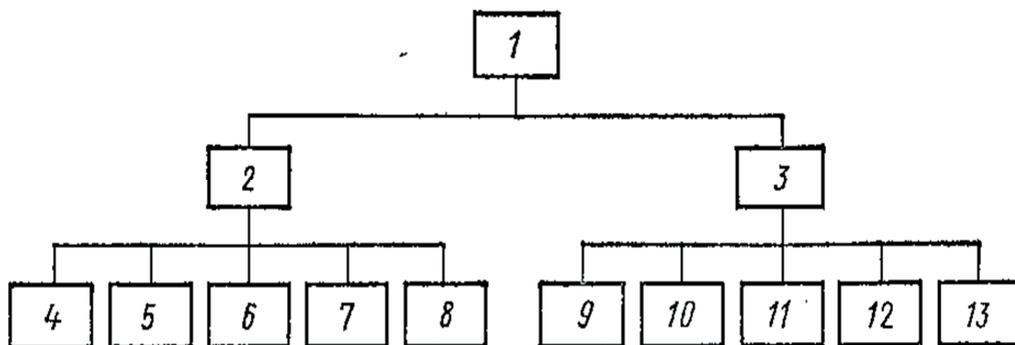


Рисунок 4.2 – Классификация методов капиллярной дефектоскопии: 1 – методы капиллярной дефектоскопии; 2 – основные; 3 – комбинированные; 4 – ахроматический; 5 – цветной (хроматический); 6 – люминесцентный; 7 – люминесцентно-цветной; 8 – фильтрующих частиц; 9 – капиллярно-электростатический; 10 – капиллярно-электроиндуктивный; 11 – капиллярно-магнитопорошковый; 12 – капиллярно-радиационный излучения; 13 – капиллярно-радиационный поглощения

Таблица 4.1 – Характер индикаторного рисунка дефектов основных методов капиллярной дефектоскопии

Метод капиллярной дефектоскопии (класс)	Характеристика рисунка дефекта
Яркостный (ахроматический)	Ахроматический, черный или серый, имеет только яркостный контраст с фоном и виден при дневном свете
Цветной (хроматический)	Имеет цветовой и яркостный контраст с фоном и виден при дневном свете
Люминесцентный	Имеет цветовой и яркостный контраст в ультрафиолетовых лучах
Люминесцентно-цветной	Имеет цветовой и яркостный контраст при дневном свете и в ультрафиолетовых лучах
Фильтрующихся частиц	Имеет цветовой и яркостный контраст при дневном свете или в ультрафиолетовых лучах. В месте дефекта накапливается отложение окрашенных или люминесцирующих частиц (изменяется микрорельеф наблюдаемой поверхности)

(с добавками поверхностно-активных веществ) или суспензии на основе органических растворителей.

Проникающая жидкость, просачиваясь в слой мела, вызывает его потемнение, которое обнаруживают осмотром при дневном свете. Этот метод имеет малую чувствительность и редко применяется для обнаружения поверхностных дефектов. Он широко используется для поиска течей в емкостях и трубопроводах гидравлических и топливных систем.

К *ЯКД* относятся также методы контроля, в которых в качестве проникающих жидкостей применяют растворы дубильной или галловой кислоты. Эти жидкости образуют индикаторный рисунок черного цвета, хорошо заметный на светлом фоне полированного металла.

При *цветной дефектоскопии (ЦКД)* применяют проникающие жидкости или реактивы, которые после нанесения проявителя образуют красный индикаторный рисунок, хорошо видимый на белом фоне проявителя. Красный цвет вследствие особенностей его восприятия глазом обеспечивает большую вероятность обнаружения индикаторных рисунков. Методы люминесцентной дефектоскопии (*ЛКД*) основаны на свойстве проникающей жидкости люминесцировать под воздействием ультрафиолетовых лучей. Вследствие большой яркости и высокого возбуждающего воздействия на зрение светящегося в темноте индикаторного рисунка, требования к цвету этих жидкостей менее жесткие, чем при *ЦКД*. При *ЛКД* индикаторный рисунок рассматривается на темном фоне, наибольший яркостный и цветовой контраст обеспечивается при белом (бело-желтом), красном или оранжевом цветах люминесценции.

Методы *люминесцентно-цветной дефектоскопии (ЛЦКД)* отличаются тем, что образующиеся при этом индикаторные рисунки не только люминесцируют в ультрафиолетовых лучах, но и имеют окраску, вызываемую избирательным

поглощением части световых лучей. Рисунки обнаруживаются и в ультрафиолетовых лучах, и при дневном свете.

Методы *фильтрующихся частиц* (ФКД) отличаются тем, что при этом используются проникающие жидкости, содержащие окрашенные или люминесцирующие взвешенные частицы размером от нескольких микрон до сотых долей миллиметра. Методы ФКД применяют для обнаружения трещин и других дефектов в поверхностном слое пористых материалов.

В зависимости от типа применяемых дефектоскопических материалов каждый класс основных методов КД (см. рисунок 4.2) делят на подклассы (варианты). Варианты методов, классифицируемых в зависимости от типа используемого проявителя, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Методы капиллярной дефектоскопии в зависимости от типа используемого проявляющего материала

Метод	Проявляющий материал
Самопроявляющий	Нет
Порошковый	Проявляющий порошок, окись магния, тальк, силика-гель, мел, аморфный кремнезем (аэросил, белая сажа), каолин и др.
Суспензионный	Суспензия проявляющего порошка в воде или органических растворителях
Красочный (лаковый)	Проявляющая краска (лак)
Пленочный	Липкая лента, пленка

Капиллярно-электростатический метод – электростатический порошковый метод дефектоскопии с предварительным заполнением полостей дефектов ионогенной проникающей жидкостью, т. е. жидкостью, легко диссоциирующей на ионы. Этот метод применяют для контроля изделий из неэлектропроводных материалов: пластмассы, керамики, стекла и т. п.

При *капиллярно-электроиндуктивном контроле* деталей полости дефектов заполняют электропроводной проникающей жидкостью или органическим растворителем (топливом) с присадками, придающими ему свойство электропроводности. Дефекты выявляют с помощью токовихревого прибора с проходным или накладным датчиком.

Этот способ применяют для контроля качества пластмасс и других неметаллических материалов.

Капиллярно-магнитопорошковый метод представляет собой комбинацию капиллярного (люминесцентного или цветного) и магнитопорошкового методов. Детали обрабатывают проникающей жидкостью, намагничивают и выявляют дефекты составом, включающим ферромагнитный порошок и белый проявитель для КД. Этот состав выявляет трещины проникающей жидкостью и магнитным порошком, образуя двухцветную картину, что позволяет безошибочно отличить рисунок трещин от других дефектов.

При *капиллярно-радиационном контроле излучением* дефекты выявляются благодаря радиоактивности индикаторной жидкости. Капиллярно-радиационный метод поглощения основан на предварительном заполнении полостей дефектов оптически плотной проникающей жидкостью и последующим рентгенографированием детали. Такому контролю подвергают, например, легкие металлы, обладающие высокой прозрачностью для рентгеновских лучей, после их пропитки четыреххлористым углеродом.

Большое разнообразие методов КД вызвано соответствующими потребностями производства и эксплуатации. Методы не являются полностью взаимозаменяемыми, а отличаются техническими возможностями, чувствительностью, производительностью и другими показателями.

Методы КД позволяют обнаруживать нарушения сплошности материала при следующих основных условиях:

- Когда несплошности материала имеют свободные полости; если полости дефектов выходят на поверхность деталей; когда глубина дефектов значительно превышает их ширину. Если ширина поверхностного повреждения больше его глубины (риска, царапина), то оно легко заполняется проникающей жидкостью. При удалении с поверхности детали жидкость также легко и полностью удаляется из повреждения. Такой дефект, как правило, методом КД не выявляется.
- Если ширина несплошности равна глубине или несколько меньше ее, то из ее полости жидкость также легко удаляется. Однако в этом случае жидкость может в небольшом количестве остаться в несплошности. Тогда несплошность может быть выявлена капиллярным методом.
- Если глубина несплошности значительно (в 5–10 раз и более) превышает ее ширину, то проникающая жидкость, заполняющая полость дефекта, надежно удерживается капиллярными силами при удалении жидкости с поверхности детали. Такие дефекты выявляются методами КД.
- При ЦКД с использованием проявителей – красок, наряду с дефектами типа несплошности материала, образующими красный индикаторный рисунок, в процессе осмотра деталей могут быть обнаружены незначительные повреждения, углубления поверхности (риски, забоины, эрозионные повреждения и др.), которые не образуют индикаторного рисунка, но становятся более видимыми из-за наличия теней при боковом освещении и большого контраста на белом фоне проявляющей краски. Капиллярная дефектоскопия – очень простой способ, имеющий высокую чувствительность к поверхностным дефектам.

Достоинства методов КД:

- высокая чувствительность;
- высокая разрешающая способность;
- относительно высокая достоверность контроля;
- наглядность результатов контроля;
- возможность контроля деталей разной степени сложности;
- возможность контроля в один прием широких зон деталей;

- большая номенклатура материалов проверяемых деталей (аустенитные стали, никелевые, титановые, магниевые, алюминиевые и другие металлические сплавы, керамика, стекло, бетон и т. д.);
- универсальность основных технологических операций при контроле объектов из различных материалов;
- возможность точно устанавливать место дефекта, направление, протяженность и иногда его характер;
- простота технологических операций контроля;
- возможность быстрой подготовки кадров контролеров;
- низкая стоимость используемых материалов.

Таким образом, методы КД сочетают в себе ценные для производственного и эксплуатационного контроля качества: наглядность результатов с большой универсальностью технологических операций при проверке поверхности деталей из различных материалов, сколь бы сложной ни была форма этих деталей.

Недостатки методов КД:

- высокая трудоемкость контроля при отсутствии механизации;
- возможность обнаружения только поверхностных дефектов;
- большая длительность процесса (до 0,5–1,5 ч);
- снижение достоверности контроля при отрицательных температурах;
- необходимость удаления лакокрасочных покрытий и тщательной предварительной очистки контролируемых деталей;
- низкая вероятность обнаружения дефектов, перекрытых окисными пленками, тонким слоем деформированного материала (после механической обработки) или сжатых значительными остаточными или рабочими напряжениями в детали;
- сложность механизации и автоматизации контроля; громоздкость стационарного оборудования;
- вредность некоторых дефектоскопических материалов для персонала и необходимость использования защитных приспособлений и вентиляции;
- субъективность контроля, зависимость достоверности результатов от умения и состояния контролера;
- ограниченный срок хранения дефектоскопических материалов, зависимость их свойств от продолжительности хранения и температуры среды.

Однако, несмотря на недостатки, эти методы находят широкое применение.

Методы КД используют при операционном и приемочном контроле полуфабрикатов, деталей и изделий на машиностроительных и ремонтных заводах, а также при периодических проверках в процессе эксплуатации механизмов и машин. Их применяют в лабораторных, цеховых и полевых условиях, при положительной и отрицательной температуре. Методы КД позволяют обнаруживать различные открытые поверхностные дефекты производственно-технологического и эксплуатационного характера: трещины (шлифовочные, термические, усталостные), растрескивание, пористость, закаты, волосовины, заковы, различные виды

коррозии и т. п. на деталях простой и сложной формы, изготовленных из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс и других материалов.

Высокая чувствительность этих методов дает возможность находить трещины с шириной раскрытия у выхода на поверхность более 0,001 мм, глубиной более 0,01 мм и длиной более 0,1 мм.

Благодаря высокой чувствительности, простоте контроля и наглядности результатов методы КД находят применение не только для первичного обнаружения, но и для подтверждения поверхностных дефектов, выявленных токовихревым, ультразвуковым и другими методами неразрушающего контроля.

По достоверности получаемых результатов контроля методы КД, как правило, несколько уступают магнитопорошковому методу, результаты которого не зависят от качества очистки полостей дефектов. Поэтому детали из ферромагнитных сплавов в основном проверяют магнитопорошковым методом, а КД используют для контроля деталей из немагнитных сплавов: алюминиевых, титановых, магниевых, никелевых и т. д. Однако в ряде случаев магнитопорошковый метод для контроля ферромагнитных деталей может быть недостаточно эффективен. Не всегда можно проверить магнитным методом некоторые объекты, например, торцовые поверхности валов, резцов, выступающие грани шлицевых соединений, вершины зубьев зубчатых колес, концевые участки деталей (при продольном намагничивании).

Во всех этих случаях для контроля ферромагнитных деталей эффективнее применять методы КД. Иногда их применяют также для контроля ферромагнитных деталей, где использование магнитопорошкового метода возможно, но затруднено или нецелесообразно (из-за попадания магнитного порошка в зазоры трущихся деталей, намагничивания деталей подшипников и т. д.).

4.2. Физические основы контроля методами капиллярной дефектоскопии

4.2.1. Метод смачивания

Под смачиванием понимают способность жидкости образовывать устойчивую поверхность раздела на границе с твердым телом при условии, что избыточная жидкость стекла с поверхности. Если силы взаимодействия между молекулами жидкости и твердого тела больше, чем между молекулами самой жидкости, то жидкость хорошо смачивает поверхность твердого тела, образует с ним устойчивую поверхность раздела, прилипает к нему. При статическом смачивании капля жидкости принимает на поверхности твердого тела форму линзы. Равновесие капли определяется так:

$$a_{\text{о.А}} - a_{\text{о.Е}} = a \cos \theta , \quad (4.1)$$

где $\alpha_{\text{д.а}}$, $\alpha_{\text{д.ж}}$ и α – соответственно поверхностное натяжение на границе твердое тело–воздух, твердое тело–жидкость, жидкость–воздух; θ – краевой угол смачивания, образованный плоской поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к поверхности жидкости в точке границы смачивания. Краевой угол отсчитывается внутрь жидкости.

Косинус краевого угла является мерой статического смачивания:

$$\cos \theta = \frac{\alpha_{\text{т.в}} - \alpha_{\text{т.ж}}}{a} \quad (4.2)$$

Разность $\alpha_{\text{д.а}} - \alpha_{\text{д.ж}}$ называется напряжением смачивания. Чем она больше, тем меньше краевой угол и лучше смачивание. Если $\cos \theta$ приближается к единице, то наблюдается полное смачивание, краевой угол смачивания уменьшается, стремясь к нулю. Избыток жидкости безгранично растекается по поверхности твердого тела. При $\cos \theta = -1$ наблюдается полное несмачивание, жидкость не вступает в физико-химическое взаимодействие с твердым телом.

Диаметр пятна, образованного строго дозированной каплей смачивающей жидкости, или скорость, с которой фронт пятна наступает на чистую поверхность металла, а также характер изменения этой скорости могут быть приняты за меру смачивания жидкостей для КД. Однако указанные параметры зависят не только от напряжения смачивания, но и от других факторов, прежде всего, от вязкости жидкости, ее плотности, летучести, а также от максимальной высоты растекающегося пятна жидкости. Поэтому по растекаемости можно непосредственно судить только о смачивании одной и той же жидкостью разной твердой поверхности. При сравнении смачивания разных жидкостей в результаты измерений должны вводиться поправки, учитывающие влияние всех указанных выше факторов.

Из формулы 4.2 видно, что лучшее смачивание обеспечивают жидкости с малым поверхностным натяжением. Это должно учитываться при выборе жидкостей для КД.

На смачивание оказывает влияние шероховатость поверхности. С повышением шероховатости смачивание улучшается. Поэтому некоторые масла и жирные кислоты не растекаются по полированной поверхности, но растекаются по шероховатой. У стенок трещин шероховатость, как правило, выше, чем у обработанной поверхности. Поэтому следует ожидать, что в чистых полостях трещин у жидкостей будет более высокая смачивающая способность по отношению к металлу.

4.2.2. Капиллярные явления

Под влиянием поверхностного натяжения плоская поверхность жидкости стремится к сокращению. Если поверхность жидкости не плоская, то это приводит к возникновению в объеме жидкости давления, дополнительного к тому, которое испытывает жидкость с плоской поверхностью. В случае выпуклой поверхности это дополнительное давление направлено внутрь жидкости (давление

положительно). При этом жидкость испытывает дополнительное сжатие. В случае вогнутой поверхности давление отрицательно, поверхностный слой, стремясь сократиться, растягивает жидкость.

Добавочное давление возрастает с увеличением коэффициента поверхностного натяжения и кривизны поверхности жидкости. Добавочное давление Δp под произвольной поверхностью может быть определено с помощью формулы Лапласа:

$$\Delta p = (a \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}), \quad (4.3)$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны поверхности жидкости в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через нормаль к поверхности в данной точке.

Добавочное давление обуславливает изменение уровня жидкости в узких трубках (капиллярах), поэтому его иногда называют капиллярным и само явление изменения уровня относят к числу капиллярных. Характер изменения уровня зависит от степени смачивания жидкостью стенок капилляров и их радиуса кривизны. В общем случае с учетом смачивания капиллярное давление:

$$\Delta p = a \cos \theta (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) . \quad (4.4)$$

Смачивающие жидкости заполняют узкие полости любой формы. Необходимое условие этого – это то, что размеры полостей должны быть настолько малы, чтобы жидкость могла образовать мениск сплошной кривизны, без плоских участков. Под действием капиллярных сил смачивающие жидкости заполняют полости трещин и других поверхностных дефектов типа несплошности материала. Находящийся в полостях дефектов воздух частично вытесняется из них, частично сжимается или растворяется в жидкости.

Полости трещин чаще всего имеют форму узкого клина, вершина которого обращена внутрь материала. Попав в трещину, смачивающая жидкость продолжает проникать вглубь полости, если ее даже полностью удалить с поверхности. В этом случае жидкость в полости трещины образует два мениска, вызывающих появление двух капиллярных давлений. Их равнодействующая направлена вглубь полости и равна:

$$P = P_1 - P_2 = a \cos \theta (\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}) , \quad (4.5)$$

где $R_2 > R_1$ – соответственно радиусы кривизны второго и первого менисков в плоскости перпендикулярного сечения трещины.

Жидкость, заполнившая полость трещины, будет удерживаться в ней капиллярными силами даже в том случае, если ее удалять с поверхности детали. Однако если на мениск, расположенный в устье трещины, наложить пористое вещество, то он исчезнет. Вместо этого мениска образуется система малых менисков различной

формы и большой кривизны. Каждый мениск создает капиллярное давление P_n , которое существенно превышает давление P_1 и действует в противоположном ему направлении. Под действием суммы давлений $\sum_n^\infty = 1P_n > P_1$ жидкость покидает полость трещины, поднимается на поверхность детали и образует индикаторный рисунок.

4.2.3. Сорбционные явления

Сорбционные процессы оказывают существенное влияние на проявление дефектов при КД. При использовании в качестве проявителей сухих порошков и суспензий на поверхности каждой частицы проявителя адсорбируются молекулы жидкости, мигрирующей из полостей дефектов. При физической адсорбции молекулы жидкости сохраняют свое первоначальное строение. При химической адсорбции они образуют на поверхности частиц химическое соединение с веществом проявителя.

При использовании проявителей – красок (лаков) наблюдается абсорбция жидкости: весь проявитель, находящийся над полостью дефекта, равномерно поглощает находящуюся в полости жидкость. При этом жидкость растворяет проявитель, и сама растворяется в нем. При наличии в таком проявителе частиц твердого пигмента процесс поглощения жидкости носит сложный характер и состоит из адсорбции и абсорбции.

Если в процессе проявления дефекта жидкость имеет высокую летучесть и проявитель быстро сохнет, то над дефектом образуется стабильный индикаторный рисунок, неопределенно долго сохраняющий свою форму и цвет. При использовании малолетучей жидкости или медленно сохнущего проявителя образуется нестабильный, расплывающийся со временем рисунок.

Скорость сорбционных процессов в проявителе зависит главным образом от скорости диффузии жидкости и растворенных в ней веществ, в слой проявителя. Количество диффундирующего вещества, проходящего за время t через площадку S , определяется следующей зависимостью:

$$m = D \frac{C_1 - C_2}{l} St, \quad (4.6)$$

где C_1 и C_2 – концентрации диффундирующего вещества – проникающей жидкости в двух слоях проявителя, отстоящих друг от друга на расстояние l ; D – коэффициент молекулярной диффузии.

При повышении температуры коэффициент диффузии увеличивается. Это приводит к ускорению проявления дефектов, если жидкость не испаряется. Для летучей жидкости потеря ее массы вследствие испарения может превышать прирост поступления в проявитель диффундирующей жидкости, что приводит к ухудшению выявляемости или невыявлению дефектов.

4.3. Технологические операции капиллярной дефектоскопии и особенности их выполнения

4.3.1. Основные технологические операции капиллярной дефектоскопии

При контроле очищенных деталей методами ЦКД, ЛКД и ЛЦКД последовательно выполняют следующие технологические операции: нанесение проникающей жидкости на детали; удаление проникающей жидкости с поверхности проверяемых деталей; нанесение проявителя; осмотр деталей; удаление проявителя и следов других дефектоскопических материалов с поверхности годных деталей.

Проникающую жидкость наносят на поверхность деталей, чтобы заполнить полости возможных поверхностных дефектов. Продолжительность контакта жидкости с поверхностью детали зависит от физических свойств жидкости, характера обнаруживаемых дефектов и способа заполнения жидкостью полостей дефектов.

Проникающую жидкость удаляют с поверхности так, чтобы она сохранилась в полостях дефектов. В некоторых случаях жидкость не удаляют с поверхности, а нейтрализуют каким-либо способом, предотвращающим появление фона после нанесения проявителя.

Проявитель наносят на поверхность деталей для выявления проникающей жидкости, оставшейся в полостях дефектов, а также для получения соответствующего фона и для обнаружения, таким образом, самих дефектов. Проявитель наносят сразу же после удаления проникающей жидкости.

Осмотр с целью обнаружения образовавшегося над дефектами индикаторного рисунка проводят после выдержки деталей, достаточной для наиболее полного и четкого проявления дефектов. Продолжительность выдержки зависит от свойств дефектоскопических материалов, от типа дефектов, материала деталей, условий их эксплуатации, температуры и давления среды в процессе проявления.

Проявители удаляют с помощью воды, растворителей или другими способами с поверхности всех деталей, признанных годными к эксплуатации. На слой проявителя не допускается наносить лакокрасочные покрытия и консервационные смазки, так как проявитель ухудшает их защитные свойства.

Операции по нанесению и удалению проникающей жидкости и нанесению проявителя должны проводиться непосредственно друг за другом с минимальным интервалом времени.

Заполнение полостей дефектов проникающей жидкостью

Различают пять способов заполнения полостей дефектов проникающей жидкостью (таблица 4.3).

Капиллярный способ является наиболее простым и широко применяется в производственных условиях. Он заключается в том, что проникающую жидкость наносят на контролируемую поверхность и выдерживают на ней столько, сколько требуется для заполнения ею полостей дефектов под действием капиллярных сил.

Таблица 4.3 – Способы заполнения полостей дефектов проникающей жидкостью

Способ	Технологическая характеристика
Капиллярный	Самопроизвольное заполнение полостей дефектов проникающей жидкостью, наносимой на контролируемую поверхность смазыванием, погружением, струйно, распылением с помощью сжатого воздуха, фреона или инертного газа
Вакуумный	Заполнение полостей дефектов проникающей жидкостью при пониженном давлении в полостях
Компрессионный	Заполнение полостей дефектов проникающей жидкостью при воздействии на нее повышенного давления
Ультразвуковой	Заполнение полостей дефектов проникающей жидкостью при воздействии на нее ультразвуковых колебаний
Деформационный	Заполнение полостей дефектов проникающей жидкостью при воздействии на объект контроля упругих колебаний звуковой частоты или статического нагружения, увеличивающего ширину раскрытия трещин

При этом поверхность деталей все время должна быть смочена жидкостью, для чего при пользовании кистью жидкость наносят в несколько слоев.

Капиллярный способ применяют в основном при температуре окружающей среды. Однако в ряде случаев для ускорения заполнения полостей, проникающую жидкость или проверяемую деталь предварительно подогревают.

Капиллярный способ с предварительным подогревом проникающей жидкости применяют при контроле с использованием вязких малолетучих жидкостей на основе масла.

При нагревании уменьшаются вязкость и поверхностное натяжение жидкостей, улучшается (до некоторого предела) смачиваемость ими поверхности металла в полости дефектов. Это в итоге приводит к ускорению процесса заполнения полостей. Нагревание проникающих жидкостей на основе масел до температуры 60 °С приводит к ускорению заполнения полости дефекта в 4–5 раз, а некоторых жидкостей – даже до 30–50 раз.

При использовании маловязких жидкостей (на основе ксилола, этилового и бутилового спиртов, этил ацетата и др.) способ предварительного нагревания жидкостей не применяют. Ускорение процесса заполнения полостей при этом мало, но в значительной степени повышается летучесть жидкостей, резко увеличивается пожаро- и взрывоопасность работ, усиливается вредное воздействие паров жидкостей на организм человека, изменяется состав проникающих жидкостей и ухудшаются их дефектоскопические свойства.

Капиллярный способ заполнения полостей дефектов с предварительным подогревом детали также применяют при контроле с использованием вязких малолетучих жидкостей. Подогретая деталь, погруженная в жидкость, нагревает тонкий слой жидкости, прилегающий к поверхности детали. Это приводит, как и в предыдущем способе, к повышению скорости заполнения полостей дефектов.

Кроме того, при нагревании детали часть воздуха выходит из полости дефекта. При последующем охлаждении детали, погруженной в жидкость, полости дефектов заполняются проникающей жидкостью на большую глубину. Если деталь была нагрета до 60 °С, дополнительный объем заполняющей дефект жидкости составляет более 14 % объема полости, а при нагревании детали до 100 °С – примерно 30 %.

Изменение объема полости и ширины раскрытия дефекта при нагревании детали в указанных пределах незначительно (0,05–0,1 %) и не оказывает существенного влияния на процесс заполнения полостей дефектов.

Вакуумный способ заполнения полостей дефектов может быть двух видов: с предварительным вакуумированием и с одновременным вакуумированием. При заполнении полостей дефектов с предварительным вакуумированием, детали помещают в герметичную камеру, из которой откачивают воздух. При этом из полостей поверхностных дефектов удаляются воздух и различные испаряемые загрязнения. Затем в камеру подают проникающую жидкость. После этого камеру разгерметизируют. Жидкость заполняет полости дефектов под действием капиллярного и атмосферного давлений. При разрежении 10^{-2} мм рт. ст. выявляются трещины шириной на порядок меньше, чем при капиллярной пропитке.

Способ с одновременным вакуумированием отличается от предыдущего тем, что в герметичную камеру с деталями сначала подают малолетучую проникающую жидкость, затем ее удаляют и в камере создают вакуум. Воздух, покидая полости дефектов, проходит через пленку жидкости, оставшейся на поверхности деталей. После разгерметизации камеры жидкость проникает в полости дефектов так же, как в предыдущем способе, под действием капиллярного и атмосферного давлений.

Способы заполнения полостей дефектов с использованием вакуума применяется редко, так как вакуумирование усложняет процесс. Кроме того, под влиянием вакуума происходит быстрое испарение легких фракций проникающих жидкостей, что меняет их свойства и может ухудшать результаты контроля.

При *компрессионном способе* жидкость быстро заполняет полости дефектов под действием капиллярного и внешнего избыточного давлений. Вследствие увеличения до некоторого предела растворимости воздуха и газов, оставшихся в несплошностях материала в жидкости, достигается более полное заполнение полостей дефектов.

Однако эффективность этого способа во многих случаях невелика. С увеличением давления до значительного, ухудшаются капиллярные свойства жидкостей – уменьшается их поверхностное натяжение, увеличивается вязкость, ухудшается смачиваемость твердых тел.

При *ультразвуковом способе* ускоряется процесс заполнения полостей дефектов, особенно загрязненных или сжатых остаточными напряжениями, действующими в материале детали. Наибольший эффект при воздействии колебаний на жидкость достигается при использовании проникающих жидкостей высокой

и средней вязкости (нориола, шубекола, смесей масла с керосином и др.) и в том случае, если направление колебаний совпадает с плоскостью полости дефекта.

При заполнении полостей дефектов *деформационным способом* вследствие влияния колебаний низкой частоты, более полно смачивается проникающей жидкостью поверхность деталей сложной формы, улучшаются условия смачивания полостей дефектов, полнее заполняется их объем. При воздействии статических сил, способствующих увеличению ширины раскрытия полостей дефектов, улучшаются условия заполнения этих полостей и выявления дефектов жидкостями различной вязкости, в том числе низковязкими.

4.3.2. Удаление проникающей жидкости с поверхности деталей

Способы удаления проникающей жидкости с поверхности выбирают, учитывая необходимость ее сохранения в полостях дефектов, а также тип используемой проникающей жидкости, шероховатость поверхности, локальность проверки, условия контроля (цеховые, полевые или лабораторные), объем работ и требуемую производительность труда.

Способ удаления жидкостей протиркой ветошью или бумагой (см. таблицу 4.4) применяют в случае использования невысыхающих жидкостей (трансформаторного масла, смеси масла с керосином, скипидаром и др.) при локальном контроле деталей в цеховых, полевых и лабораторных условиях. При большом объеме работ в цеховых условиях, а также при контроле шероховатых деталей с чистотой обработки ниже пятого класса этот способ, как правило, не применяют.

Промывка – один из способов удаления проникающей жидкости, используемых при контроле массовых деталей в цеховых условиях. Этот способ применяют в основном при полном контроле всей поверхности деталей с различной чистотой

Таблица 4.4 – Способы удаления проникающей жидкости с поверхности деталей

Способ	Технологическая характеристика
Протирка	Удаление проникающей жидкости ветошью или бумагой с применением или без применения очищающего состава или растворителя
Промывка	Удаление проникающей жидкости растворителем – водой, органическим растворителем или специальным очищающим составом (погружением, струйно или распыленным потоком), или парами органических растворителей
Обдувка	Удаление проникающей жидкости струей песка, дроби, косточковой крошки, опилок
Гашение люминесценции или цвета	Устранение люминесценции или окраски проникающей жидкости воздействием на нее вещества-гасителя или облучением
Комбинированный	Удаление проникающей жидкости последовательно двумя и более способами (промывкой и протиркой, обдувкой и протиркой и т. д.)

обработки. Он может быть использован при контроле деталей простой и сложной формы, в том числе полых, с мелкими отверстиями и пазами и т. д. Промывку проводят органическими растворителями, водой или специальными очищающими жидкостями.

Легколетучие растворители (бензин, ацетон, растворитель 645 и др.) применяют для удаления относительно вязких проникающих жидкостей, которые трудно удалить из полостей дефектов. Вследствие высокой проникающей способности эти растворители все же могут удалять из полостей дефектов и некоторую часть проникающей жидкости, особенно из полостей дефектов, расположенных на кромках, ребрах и других выступающих элементах деталей. Поэтому использование легколетучих растворителей для удаления проникающей жидкости допускается только тогда, когда нет необходимости обеспечивать особо высокую чувствительность контроля.

Малолетучие и нелетучие органические растворители применяют для удаления проникающей жидкости из зон контроля деталей в тех случаях, когда растворитель не препятствует проявлению дефекта, и нет необходимости принимать дополнительные меры для удаления этого растворителя с поверхности детали. Промывку водой и водными очищающими составами применяют в этих же случаях.

Нерастворимые в воде жидкости, содержащие масло, керосин, скипидар и другие органические растворители, удаляют струей воды, подаваемой под давлением. Для облегчения образования эмульсии в состав проникающих жидкостей или воды вводят поверхностно-активные вещества – эмульгаторы, либо наносят эти вещества на поверхность деталей непосредственно перед применением воды.

Обдувку в основном применяют для удаления невысыхающих или малолетучих жидкостей, если не требуется высокой чувствительности: при контроле литья, поковок перед механической обработкой и т. д. При пескоструйной обработке совмещаются операции удаления проникающей жидкости и окалины.

Гашением устраняется люминесценция или окраска при использовании специальных проникающих жидкостей.

При контроле массовых деталей в цеховых условиях в основном применяют *комбинированный способ*. Используют следующие сочетания технологических операций: промывку нелетучими органическими растворителями и протирку ветошью; промывку водой (или очищающей жидкостью, затем водой), протирку ветошью или сушку; обдувку суспензией песка, дробы в воде, затем протирку ветошью или сушку.

4.3.3. Нанесение проявителя

Способ нанесения проявителя (таблица 4.5) выбирают с учетом следующих основных факторов: требуемой чувствительности контроля; типа и свойств проявителя; степени сложности формы поверхности детали; условий воздухообмена при контроле, наличия вентиляции; степени локальности контроля; объема работ

Таблица 4.5 – Способы нанесения проявителя

Способ	Технологическая характеристика
Нанесение кистью	Нанесение жидкого проявителя кистью, щеткой или заменяющими их средствами
Распыление	Нанесение проявителя струей воздуха, фреона, инертного газа или механическим методом (под давлением)
Электрораспыление	Нанесение проявителя в электростатическом поле с распылением его струей воздуха, механическим методом или под воздействием сил поля
Погружение	Нанесение жидкого проявителя кратковременным погружением в него детали
Электроосаждение	Нанесение жидкого проявителя погружением в него детали с одновременным воздействием электрического тока
Обливание	Нанесение жидкого проявителя на поверхность детали струей с помощью насосов или самотеком
Воздушной взвеси	Нанесение порошкообразного проявителя путем создания его воздушной взвеси в камере, в которую помещена деталь
Посыпание	Нанесение порошкообразного проявителя припудриванием или обсыпанием детали
Наложение липких пленок	Нанесение ленты пленочного проявителя прижатием ее липкого слоя к детали

и необходимой производительности труда; условий контроля (цеховые, полевые или лабораторные).

Нанесение кистью – наиболее простой и доступный способ нанесения проявителя. Его применяют для нанесения проявителей – красок и суспензий при контроле малых зон деталей и при контроле деталей в конструкции механизмов и машин (без их демонтажа). Этим способом наносят проявитель в лабораторных и полевых условиях, а также в цеховых при небольшом объеме работ или в условиях плохого воздухообмена, когда невозможно применить краскораспылитель.

При пользовании кистью расход проявителя значительно меньше, чем при нанесении его, например, краскораспылителем. Окружающий воздух меньше насыщается вредными для человека парами растворителей и аэрозолем проявителя и, следовательно, нет необходимости обеспечивать интенсивный воздухообмен на рабочем месте.

Кистью невозможно нанести равномерный слой проявителя и получить предельно высокую чувствительность контроля. При пользовании кистью нельзя контролировать участки деталей сложной формы: узкие пазы, резьбу, канавки и т. п. Кроме того, контроль деталей с применением кисти трудоемок и малопроизводителен.

Способ *распыления* проявителя обеспечивает наиболее высокую чувствительность контроля методами КД. Проявитель ложится на поверхность в зоне контроля равномерным слоем, в том числе на поверхность деталей сложной формы.

Для достижения необходимой укрывистости и белизны фона при ЦКД проявитель может быть нанесен на деталь многократно, в несколько слоев.

Однако пневматическое распыление вызывает большие потери проявителя из-за туманообразования (20–40 % и более). При использовании проявителей на основе органических растворителей этот способ особенно вреден для персонала, пожаро- и взрывоопасен, требует установки мощной вентиляции и систем очистки воздуха.

Способ механического (безвоздушного) распыления заключается в том, что проявитель под большим давлением ($5 \cdot 10^5 - 250 \cdot 10^5$ Па) подается к соплу, где получает вихревое движение и большое ускорение. Факел распыленного проявителя почти не создает тумана. Этот способ снижает расход проявителя, повышает производительность труда, позволяет проводить контроль при пониженном воздухообмене. Однако этим способом можно наносить ограниченное число специально подобранных проявителей.

Проявители-краски, распыляемые этим способом, должны иметь в своем составе легколетучий разбавитель и медленно испаряющийся растворитель, а также высокодисперсный пигмент. Вязкость проявителя должна быть в пределах 15–50 с (по вискозиметру ВЗ-4), наиболее оптимальная вязкость 20–35 с.

Способ *электрораспыления* обеспечивает равномерное нанесение слоя проявителя, уменьшает его расход на 30–70 % по сравнению с пневматическим, а также позволяет резко улучшить санитарно-гигиенические условия труда, снизить затраты на оборудование вентиляционных устройств, повысить производительность труда и полностью автоматизировать процесс. Однако этот способ требует повышенных капитальных затрат на электрооборудование и подбора особых рецептур проявителей. Проявители-краски и суспензии для электрораспыления должны, в частности, иметь удельное объемное сопротивление 106–107 Ом·см, относительную диэлектрическую проницаемость в пределах 6–10 при рабочей вязкости 15–25 с. Краски и суспензии на основе воды, ацетона, этилового спирта, ксилола, толуола, уайт-спирита и некоторых других растворителей для нанесения указанным способом либо совершенно непригодны, либо ими можно пользоваться только после корректировки их электрических свойств с помощью реагентов.

Способы нанесения проявителя *погружением* и *обливанием* требуют небольших затрат труда, обеспечивают высокую экономию материалов и возможность полной автоматизации процесса. Однако их применение приводит к образованию слоя проявителя неравномерной толщины, подтеков его на поверхности деталей, расплыванию рисунка дефектов и к снижению чувствительности контроля. Поэтому эти способы в основном применяют в цеховых условиях при контроле неотвественных деталей простой формы.

При использовании вязких медленно проявляющихся проникающих жидкостей и проявителей-суспензий эти способы могут обеспечивать достаточно высокую для данных дефектоскопических материалов эффективность КД.

Способ *воздушной взвеси* применяют для нанесения проявителей-порошков в цеховых условиях. Проявитель-порошок распыляют в специальных камерах с помощью струи сухого сжатого воздуха, воздушных распылителей, вентиляторов или механических (вибрационных) распыляющих устройств, создавая взвесь порошка в виде пылевидного облака. Детали помещают в камеры, в которых они покрываются тонким равномерным слоем порошка. Этот способ обеспечивает наиболее высокую чувствительность и достоверность контроля по сравнению с другими способами нанесения проявителей-порошков.

Способ *посыпания* используют при контроле деталей в цеховых условиях с применением вязких, медленно проявляющихся проникающих жидкостей. Проявитель наносят кратковременно, чтобы не допустить смазывания образующегося индикаторного рисунка или невыявления дефекта вследствие смещения частиц порошка, налипших на поверхность детали.

Способ *наложения липких пленок* применяют при локальном контроле небольших зон деталей простой формы в цеховых, полевых и лабораторных условиях при небольшом объеме работ. При этом способе используют специальные типы липких пленок-проявителей.

4.3.4. Проявление дефектов

После нанесения проявителя детали выдерживают при температуре окружающей среды (например, при температуре цеха), при повышенной температуре, в вакууме или при вибрации до окончания процесса проявления, т. е. образования индикаторного рисунка (таблица 4.6).

В настоящее время дефекты проявляют в основном временным способом – путем выдержки деталей при температуре окружающей среды. Продолжительность выдержки зависит от физических свойств дефектоскопических материалов, температуры среды и выбирается экспериментально так, чтобы обеспечить

Таблица 4.6 – Способы проявления дефектов

Способ проявления дефектов	Технологическая характеристика
Временной	Выдержка деталей на воздухе до наиболее полного проявления обнаруживаемых дефектов
Тепловой	Проявление дефектов путем нагревания деталей при атмосферном давлении
Вакуумный	Проявление дефектов путем вакуумирования пространства над поверхностью деталей с постоянным или изменяющимся по определенному закону разрежением
Вибрационный	Проявление дефектов при воздействии на деталь вибрации, циклического или статического нагружения
Комбинированный	Проявление дефектов одновременно или последовательно двумя и более способами (нагреванием в вакууме, временным, затем тепловым способом и т. д.)

максимальную чувствительность контроля и наибольшую четкость рисунка дефектов.

Для наиболее полного проявления дефектов необходимо увеличить продолжительность проявления. Однако с увеличением времени выдержки теряется четкость рисунка, что затрудняет его обнаружение и анализ.

При ЦКД и ЛКД с применением малолетучих проникающих жидкостей и проявителей – порошков и суспензий детали выдерживают от 1 до 30 мин. В некоторых случаях осмотр проводят дважды: через 5–6 мин для обнаружения крупных трещин и через 25–30 мин для обнаружения мелких.

Для достижения предельно высокой чувствительности при контроле деталей проникающей жидкостью «К» и краской «М» продолжительность до осмотра должна составлять 15–60 мин. В отличие от других, эти материалы образуют четкий стабильный рисунок дефектов, сохраняющийся в течение нескольких месяцев.

Тепловым способом дефекты проявляют главным образом при использовании малолетучих проникающих жидкостей и проявителей – порошков и суспензий. При этом ускоряется проявление дефектов по следующим причинам: благодаря быстрому испарению воды из слоя проявителя-суспензии, нанесенного на поверхность детали; из-за уменьшения вязкости проникающей жидкости и увеличения вследствие этого массы жидкости, переносимой из полости дефекта в единицу времени; вследствие увеличения объема воздуха, оставшегося в глубине полости несквозного дефекта, и выталкивания им проникающей жидкости; из-за некоторого увеличения объема проникающей жидкости. Для сушки слоя суспензии детали обдувают слабой струей (давлением $1,1 \cdot 10^5 - 1,2 \cdot 10^5$ Па) воздуха, нагретого до 70–80 °С. Наиболее эффективно нагревание деталей в печи при температуре 40–80 °С.

Нагревать детали для проявления дефектов до температуры более 40–50 °С при использовании проявителей – красок и легколетучих жидкостей нецелесообразно по следующим причинам: уменьшается масса проникающей жидкости вследствие ее испарения, иногда она полностью испаряется и не образует рисунка; быстро испаряются и не принимают участия в процессе проявления растворители, входящие, в состав проявляющей краски; слой краски становится более плотным и непроницаемым, ухудшается смачиваемость его проникающей жидкостью. Недостатком нагревания деталей в этом случае является также загрязнение полостей дефектов остатками дефектоскопических материалов, в том числе проявителя, и затруднение их выявления при повторном контроле.

Выдержку в вакууме применяют так же, как и нагревание, используя малолетучие проникающие жидкости, проявители – порошки и суспензии. Проявление в вакууме происходит быстрее, чем в условиях окружающей среды, вследствие быстрого испарения влаги из слоя проявителя, а также из-за расширения воздуха, находящегося в полости несквозного дефекта под слоем проникающей

жидкости. Однако эффективность проявления дефектов в вакууме меньше, чем при нагревании.

Вибрационный способ применяют при обнаружении зарождающихся трещин на образцах в процессе усталостных испытаний, а также при контроле некоторых типов деталей, в материале которых действуют остаточные или рабочие напряжения, сжимающие трещины.

4.3.5. Осмотр деталей и анализ рисунка дефектов

В цеховых условиях малогабаритные детали осматривают на участках с повышенной локализованной освещенностью или на рабочих местах, оборудованных комбинированным освещением. Величину освещенности при ЯКД, ЦКД и цветном варианте ЛЦКД выбирают в соответствии с действующими нормами, понимая под термином «объект различения» индикаторный рисунок, образующийся при проявлении дефекта (но не сам дефект). Осмотр деталей при КД проводят в три этапа. Сначала визуально проверяют качество нанесения проявителя, затем проводят общий осмотр поверхности для обнаружения рисунка дефектов, после этого анализируют выявленный индикаторный рисунок. Во многих случаях указанные операции совмещают.

Детали, не пригодные к осмотру, промывают, и повторяют все операции контроля. Детали с удовлетворительным качеством проявителя подвергают дальнейшему более тщательному осмотру для обнаружения дефектов. Отчистка деталей от дефектоскопических материалов после контроля (таблица 4.7).

С поверхности деталей, прошедших контроль и признанных годными, удаляют проявитель и следы других дефектоскопических материалов. Способ очистки деталей выбирают, учитывая тип применяемых дефектоскопических материалов, степень локальности проверки, условия контроля, объем работ, требования к производительности труда, и другие факторы.

Таблица 4.7 Способы удаления проявителя после контроля

Способ удаления проявителя	Технологическая характеристика
Протирка	Обработка ветошью с применением или без применения воды или органических растворителей
Промывка	Промывка в воде или в органических растворителях с необходимыми добавками и применением вспомогательных средств (щеток, губок, ветоши и др.)
Анодная обработка	Химическая обработка реактивами с одновременным воздействием электрического тока
Обдувка	Обработка проверенного объекта струей гидроабразивного или абразивного материала – песка, дроби, крошки и т. д.
Снятие пленки проявителя	Отделение ленты липкого пленочного проявителя или пленки проявляющей краски от контролируемой поверхности
Выжигание	Нагревание деталей до температуры сгорания проявителя

4.4. Варианты технологических схем контроля с применением различных методов и материалов

Многообразие способов выполнения каждой технологической операции позволяет составлять различные варианты технологии контроля деталей методами КД. Наиболее существенными факторами, влияющими на выбор схемы технологических операций, являются физические свойства используемых дефектоскопических материалов, требуемая чувствительность и условия контроля. Однако указанные факторы определяют технологию не однозначно, т. е. при использовании одних и тех же дефектоскопических материалов возможны различные варианты технологических процессов при сохранении одинаковой чувствительности.

Рассмотрим различные варианты технологических схем контроля деталей методами КД.

4.4.1. Контроль цветным порошковым методом деталей цехового оборудования, установок и трубопроводов

Дефектоскопические материалы: красная проникающая жидкость на основе керосина (80 %), скипидара (20 %) и жирорастворимого темно-красного красителя (10 г/л); проявитель – суспензия каолина (350 г/л) в смеси этилового спирта (60 %) и воды (40 %); очищающая жидкость – 5 %-ный водный раствор кальцинированной соды.

Технология контроля. Контролируемую поверхность обезжиривают бензином или ацетоном и просушивают горячим воздухом с температурой 70–80 °С. На деталь кистью наносят обильный слой красной проникающей жидкости и выдерживают ее на контролируемой поверхности в течение 8–10 мин. После выдержки деталь промывают раствором кальцинированной соды и протирают сухой чистой ветошью. На сухую поверхность распылителем наносят тонкий слой проявителя и затем подсушивают его горячим воздухом с температурой 70–80 °С. Деталь осматривают через 3–5 мин после нанесения проявителя и повторно – через 15–20 мин. С годных деталей проявитель удаляют водой или мокрой ветошью.

4.4.2. Контроль цветным красочным методом сварных швов топливных трубопроводов летательных аппаратов в условиях ремонтного предприятия для обнаружения трещин усталости

Дефектоскопические материалы: красная проникающая жидкость «К»; белая проявляющая краска «М»; очищающая жидкость – масляно-керосиновая смесь.

Технология контроля. Зону контроля промывают бензином Б-70 и обдувают воздухом с температурой 60–80 °С. Поверхность трубопровода кистью покрывают красной проникающей жидкостью в два-три слоя. После нанесения каждого слоя деталь выдерживают на воздухе в течение 1,5–2 мин (до потери подвижности жидкости). Затем на деталь наносят еще один слой жидкости и, не допуская

его высыхания, сразу же с помощью кисти наносят масляно-керосиновую смесь. Эту смесь и красную проникающую жидкость удаляют с поверхности детали сухой чистой неворсистой ветошью. На трубопровод краскораспылителем напыляют тонкий влажный слой белой проявляющей краски. Через 15–40 мин деталь осматривают при дневном свете. После осмотра проявляющую краску и следы других дефектоскопических материалов удаляют с годных деталей ацетоном или другим растворителем нитрокрасок.

4.4.3. Контроль цветным красочным методом деталей из магниевых сплавов в условиях эксплуатации

Дефектоскопические материалы: красная проникающая жидкость «К»; белая проявляющая краска «М»; очищающая жидкость масляно-керосиновая смесь.

Технология контроля. Поверхность контролируемой детали обезжиривают бензином Б-70, затем в зону контроля с помощью кисти наносят обильный слой смывки АФТ-1 и выдерживают ее на детали в течение 15–40 мин. Размягченное лакокрасочное покрытие удаляют деревянным шпателем, жесткой кистью или ветошью, смоченной растворителем 645, после чего зону контроля тщательно (2–3 раза) промывают ацетоном. После каждой промывки деталь протирают сухой чистой ветошью. После промывки деталь сушат, выдерживая на воздухе в течение 15–20 мин.

Дефектоскопические материалы наносят и удаляют с поверхности детали способами, изложенными в предыдущем варианте технологии. При контроле детали в условиях недостаточного воздухообмена проявляющую краску наносят кистью. После осмотра проявляющую краску и следы других дефектоскопических материалов удаляют ацетоном, затем принимают меры по защите поверхности детали от коррозии.

4.4.4. Контроль люминесцентно-порошковым методом литых алюминиевых деталей в условиях производства

Дефектоскопические материалы: проникающая жидкость, состоящая из керосина (85 %), трансформаторного (или авиационного) масла (15 %) и 2–5 г вспомогательного вещества ОП-7 (или ОП-Ю) на 1 л смеси; проявитель – порошок окиси магния; очищающая жидкость – вода.

Технология контроля. Контролируемые детали очищают от шлака, обдувая их косточковой крошкой, затем обезжиривают бензином или ацетоном и просушивают горячим воздухом с температурой 60–80 °С. Детали укладывают в сетчатые корзины и погружают в проникающую жидкость на 15–20 мин. Жидкость удаляют с поверхности деталей, 2–4 раза погружая их в ванну с проточной, лучше теплой, водой или обрабатывая их струей воды при давлении не более 4–5 Па. Детали сушат, протирая, например, сухими древесными опилками и обдувая теплым воздухом с температурой не более 40–50 °С. После удаления проникающей

жидкости детали осматривают в ультрафиолетовых лучах, чтобы убедиться, что поверхность хорошо очищена и не светится.

Очищенные детали размещают в камере, в которой с помощью сжатого воздуха создают взвесь порошка окиси магния. Детали в камере укладывают контролируемой поверхностью кверху, а при проверке всей поверхности их устанавливают на приспособления, позволяющие поворачивать детали в процессе обработки порошком. Покрытые порошком детали выдерживают до осмотра в течение 25–30 мин, сдувают избыток проявителя, затем осматривают в ультрафиолетовых лучах. С годных деталей остаток проявителя удаляют водой.

4.4.5. Контроль люминесцентно-красочным методом титановых лопаток ГТД в условиях производства после шлифования

Дефектоскопические материалы: проникающая жидкость ЛЖ-6А; проявляющая краска ПР-1; очищающая жидкость ОЖ-1.

Технология контроля. Лопатки укладывают в сетчатые корзины и обезжиривают, погружая их сначала в ванну с бензином Б-70, затем – с ацетоном. Следы растворителей удаляют с поверхности лопаток и из полостей дефектов путем прогрева деталей до 80–100 °С в течение 1 ч. Охлажденные до 20–35 °С лопатки погружают на 2–3 мин в проникающую жидкость, извлекают из нее и дают ей стечь в течение 30 с. Затем лопатки промывают проточной водой с температурой 20–40 °С. Продолжительность промывки – 5–10 мин.

Промытые водой детали погружают на 40–50 с в очищающую жидкость, а затем промывают водой в душевой установке. Продолжительность повторной промывки водой – 5–10 мин.

Влагу с поверхности деталей удаляют, обдувая их сжатым воздухом и протирая сухой чистой неворсистой ветошью. Затем в зону контроля краскораспылителем наносят тонкий влажный слой проявителя. Через 15–20 мин детали осматривают в ультрафиолетовых лучах. После осмотра проявитель удаляют с поверхности деталей ацетоном или другим растворителем нитрокрасок.

4.4.6. Контроль люминесцентно-красочным методом дисков ротора турбины ГТД в условиях ремонтного предприятия

Дефектоскопические материалы: проникающая жидкость ЛЖ-6А; проявляющая краска ПР-1; очищающая жидкость ОЖ-1.

Технология контроля. Для удаления нагара диски очищают электрохимическим (анодно-щелочным) способом в горячем растворе каустической соды с концентрацией 300–500 г/л. Температура раствора 60–80 °С, плотность тока 5–10 А/дм². Продолжительность очистки в зависимости от толщины и плотности нагара – 1–3 ч. Под дополнительным воздействием ультразвука (анодно-ультразвуковая очистка) нагар снимается через 10–15 мин. Очищенные диски промывают горячей, затем холодной водой, освещают в ультразвуковой ванне в 5–10 %-ном растворе

соляной кислоты в течение 1–2 мин и снова промывают, многократно погружая их в холодную проточную воду. Продолжительность промывки – 2–5 мин. Для удаления влаги и обезводораживания диски сушат при температуре 170–220 °С в течение 40–60 мин.

Для заполнения полостей дефектов охлажденные диски погружают в ванну с люминесцентной проникающей жидкостью и выдерживают в ней 5–6 мин. Если время между операциями сушки дисков и нанесением жидкости составляет 4 ч и более, диски предварительно промывают в ацетоне и высушивают до полного удаления растворителя.

После выдержки диски извлекают из ванны и оставляют над ней в течение 40 с для стекания люминесцентной проникающей жидкости. Затем в течение 5 мин их промывают в душевой установке водой с температурой 20–40 °С, кратковременно погружают в очищающую жидкость (на 40–50 с) и снова промывают водой. Следы влаги удаляют, обдувая диски сухим сжатым воздухом под давлением не более $2 \cdot 10^5$ Па и протирая их ветошью.

Проявляющую краску наносят на диски тонким равномерным влажным слоем с помощью краскораспылителя. Диски осматривают через 15–20 мин после нанесения краски. Осмотр проводят в ультрафиолетовых лучах. После осмотра проявляющую краску удаляют ацетоном или другим растворителем нитрокрасок.

4.4.7. Контроль люминесцентным методом лопаток ротора турбины ГТД в условиях производства после литья

Дефектоскопические материалы: люминесцентная проникающая жидкость ЛЖ-12; проявитель ПР-5; очищающая жидкость – 20 %-ный водный раствор вспомогательного вещества ОП-7 (ОП-Ю).

Технология контроля. Лопатки очищают в ультразвуковой ванне в водном растворе фосфорной кислоты (3,5–5 г/л) и вещества ОП-7 (ОП-Ю) или сульфанола НП-1 (10 г/л). Температура раствора 60–70 °С, продолжительность очистки 5 мин. Затем лопатки промывают в холодной воде 5–10 мин, обдувают сжатым воздухом и прогревают в печи с температурой 250–300 °С в течение 10–15 мин. После этого их охлаждают сухим сжатым воздухом и погружают в ванну с проникающей жидкостью на 10 мин (или в ультразвуковую ванну с этой жидкостью на 2–3 мин). Извлеченные из ванны лопатки выдерживают над ней в течение 30 с для стока жидкости.

Проникающую жидкость удаляют, последовательно выполняя три операции промывки: в ванне с проточной барботируемой водой; в ванне с очищающей жидкостью; в водяной душевой установке. Продолжительность каждой промывки – от 3–5 мин до 10 мин, температура жидкостей 20–40 °С.

Влагу удаляют, обдувая лопатки сжатым воздухом под давлением не более 2–5 Па или просушивая их в калорифере с температурой воздуха 60–80 °С. На сухие лопатки краскораспылителем наносят проявитель. Для ускорения проявления детали сушат в потоке теплого воздуха от калорифера при температуре

60–80 °С в течение 5–8 мин. Осмотр проводят в ультрафиолетовых лучах через 10–15 мин после сушки.

Проявитель удаляют с поверхности лопаток после контроля, нагревая их до 300–400 °С в течение 10–15 мин. При этом проявитель сгорает, не оказывая агрессивного действия на лопатки. Проявитель может быть удален также в ультразвуковой ванне в водном 50–80 %-ном растворе малонафта при температуре 70–80 °С с последующей промывкой в проточной воде.

5. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД

Ультразвуковой метод контроля был предложен советским физиком С.Я. Соколовым в 1928 году и в настоящее время является одним из основных методов неразрушающего контроля. Методы ультразвуковой дефектоскопии позволяют производить контроль сварных соединений, сосудов и аппаратов высокого давления, трубопроводов, поковок, листового проката и другой продукции. Ультразвуковой контроль является обязательной процедурой при изготовлении и эксплуатации многих ответственных изделий, таких как части авиационных двигателей, трубопроводы атомных реакторов или железнодорожные рельсы.

Ультразвуковая дефектоскопия – один из наиболее универсальных способов неразрушающего контроля, методы которого позволяют обнаруживать поверхностные и глубинные дефекты трещины, раковины, расслоения в металлических и неметаллических материалах (в том числе сварных и паяных швах, клеёных многослойных конструкциях), определять зоны коррозии металлов, измерять толщину (резонансный метод). Контроль происходит с использованием специального оборудования – преобразователя и дефектоскопа.

Физической основой методов ультразвуковой дефектоскопии является тот факт, что звуковые волны большой частоты в гомогенном теле распространяются как направленные лучи без значительной абсорбции (особенно в металле), а на границе металла с воздухом дают практически полное отражение. Ультразвук дает возможность фактически неограниченного проникновения в глубину и обнаружения дефектов любых размеров и при любом их расположении.

По сравнению с другими методами неразрушающего контроля ультразвуковой метод обладает важными преимуществами:

- высокая чувствительность к наиболее опасным дефектам типа трещин и непроваров,
- низкая стоимость,
- безопасность для человека (в отличие от рентгеновской дефектоскопии),
- возможностью вести контроль непосредственно на рабочих местах без нарушения технологического процесса,
- при проведении УЗК исследуемый объект не повреждается,
- возможность проводить контроль изделий из разнообразных материалов, как металлов, так и неметаллов.

К недостаткам ультразвукового метода контроля можно отнести невозможность оценки реального размера и характера дефекта, трудности при контроле металлов с крупнозернистой структурой из-за большого рассеяния и сильного затухания ультразвука, а также повышенные требования к состоянию поверхности контроля (шероховатости и волнистости).

5.1. Классификация ультразвуковых неразрушающих методов контроля

Многообразие задач, возникающих при необходимости проведения неразрушающего контроля различных изделий, привело к разработке и использованию ряда различных акустических методов контроля. Согласно ГОСТ 23829–85 акустические методы контроля делятся на две большие группы: использующие излучение и приём акустических колебаний и волн (активные методы) и основанные только на приёме колебаний и волн (пассивные методы).

Активные методы основаны на излучении и приеме упругих волн. Пассивные только на приеме волн, источником которых служит сам объект контроля, например, образование трещин при остывании заготовки сопровождается возникновением акустических колебаний (рисунок 5.1).

Методы отражения основаны на анализе отраженных импульсов упругих волн от неоднородностей или границ образца. Методы прохождения – на влиянии параметров образца на характеристики прошедших волн. В методах свободных колебаний о параметрах образца судят по параметрам его свободных колебаний.

Эхо-метод или *эхо-импульсный метод* (рисунок 5.2) – наиболее распространенный: преобразователь генерирует колебания (то есть выступает в роли генератора) и он же принимает отражённые от дефектов эхо-сигналы (приёмник). Данный способ получил широкое распространение за счёт своей простоты, так как для проведения контроля требуется только один преобразователь, следовательно, при ручном контроле отсутствует необходимость в специальных приспособлениях для его фиксации и совмещении акустических осей при использовании двух преобразователей. Кроме того, это один из немногих методов ультразвуковой дефектоскопии, позволяющий достаточно точно определить координаты дефекта, такие как глубину залегания и положение в исследуемом объекте (относительно преобразователя).

Эхо-импульсный метод контроля сварного соединения без дефекта (сверху) и с дефектом (снизу). В правой части изображения представлен экран дефектоскопа с изображённым на нём зондирующим импульсом (сверху) и импульсом от дефекта (снизу).

Зеркальный или *эхо-зеркальный метод* – используются два преобразователя с одной стороны детали: сгенерированные колебания отражаются от дефекта в сторону приемника. На практике используется для поиска дефектов, расположенных перпендикулярно поверхности контроля, например, трещин.

Дифракционно-временной метод – используется два преобразователя с одной стороны детали, расположенные друг напротив друга. Если дефект имеет острые кромки (как, например, трещины) то колебания дифрагируют на концах дефекта и отражаются во все стороны, в том числе и в сторону приёмника. Дефектоскоп регистрирует время прихода обоих импульсов при их достаточной амплитуде. На экране дефектоскопа одновременно отображаются оба сигнала – от

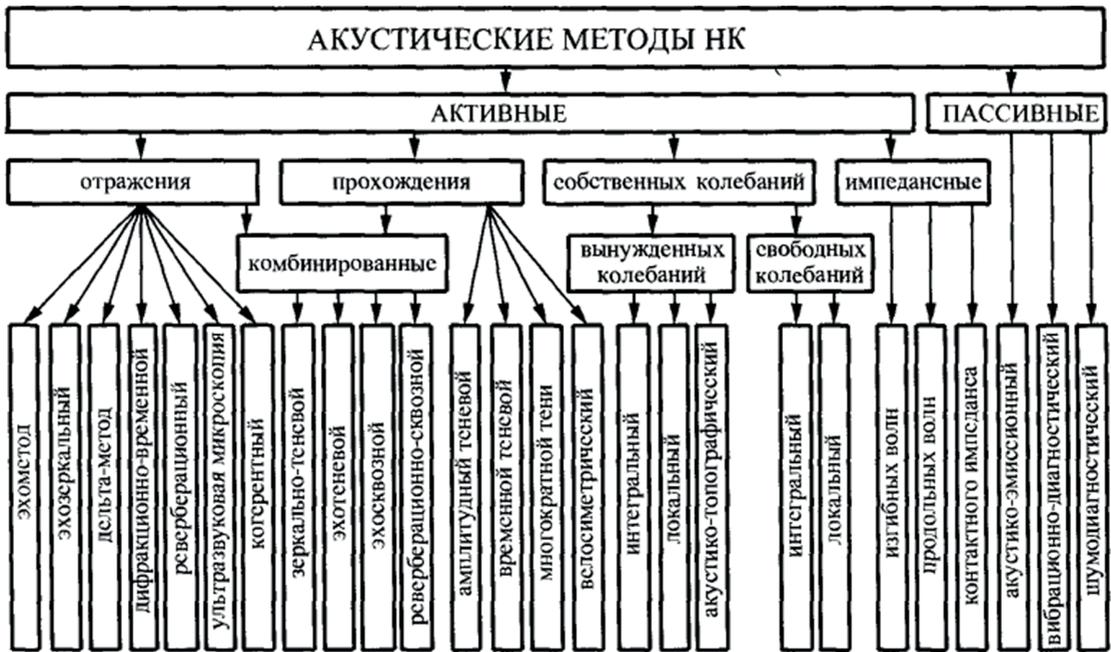


Рисунок 5.1 – Классификация методов акустической дефектоскопии

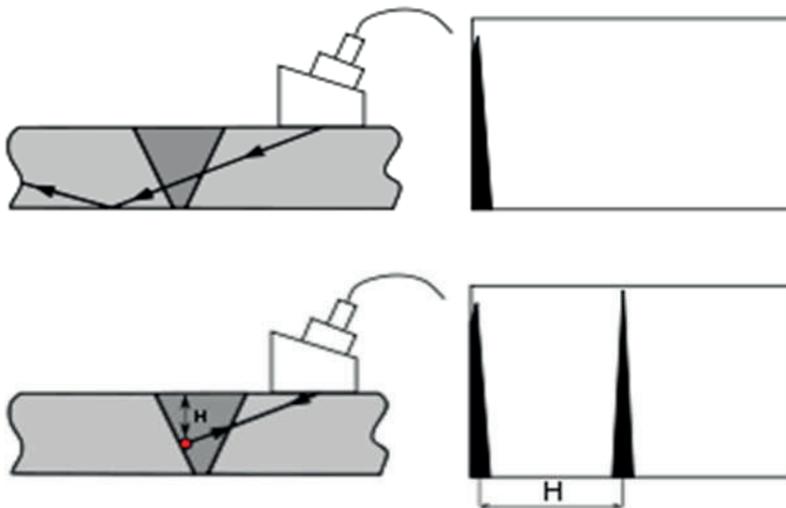


Рисунок 5.2 – Эхо-импульсный метод

верхней и от нижней границы дефекта, тем самым можно достаточно точно определить условную высоту дефекта. Способ достаточно универсален, позволяет производить ультразвуковой контроль на швах любой сложности, но требует специального оборудования для фиксации преобразователей, а также дефектоскоп, способный работать в таком режиме. Кроме того, дифрагированные сигналы достаточно слабые. На рисунке 5.3 показана трещина в угловом сварном шве, выявляемая дифракционно-временным методом контроля.

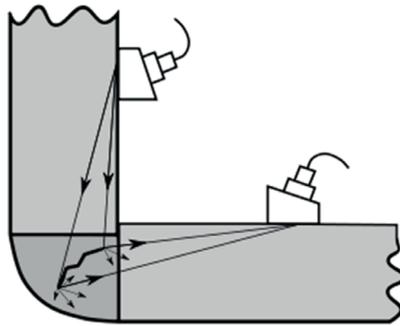


Рисунок 5.3 – Трещина в угловом сварном шве, выявляемая дифракционно-временным методом контроля

Дельта-метод – разновидность зеркального метода – отличается механизмом отражения волны от дефекта и способом принятия сигнала. В диагностике используется для поиска специфично расположенных дефектов. Данный метод очень чувствителен к вертикально-ориентированным трещинам, которые не всегда удаётся выявить обычным эхо-методом.

Ревербационный метод – основан на постепенном затухании сигнала в объекте контроля. При контроле двухслойной конструкции, в случае качественного соединения слоёв, часть энергии из первого слоя будет уходить во второй, поэтому ревербация будет меньше. В обратном случае будут наблюдаться многократные отражения от первого слоя, так называемый лес. Метод используется для контроля сцепления различных видов наплавки, например, баббитовой наплавки с чугуном основанием. Основным недостатком данного метода является регистрация дефектоскопом эхо-сигналов от границы соединения двух слоёв. Причиной этих эхо-сигналов является разница скоростей упругих колебаний в материалах соединения и их различное удельное акустическое сопротивление. Например, на границе баббит–сталь возникает постоянный эхо-сигнал даже в местах качественного сцепления. В силу конструктивных особенностей некоторых изделий, контроль качества соединения материалов ревербационным методом может быть невозможен именно из-за наличия на экране дефектоскопа эхо-сигналов от границы соединения. На рисунке 5.4 показан ревербационный метод контроля двухслойной конструкции.

Акустическая микроскопия благодаря повышенной частоте ввода ультразвукового пучка и применению его фокусировки, позволяет обнаруживать дефекты, размеры которых не превышают десятых долей миллиметра. Широкое применение в промышленности затруднено в связи с крайне низкой производительностью метода. Данный метод подходит для исследовательских целей, диагностике, а также радиоэлектронной промышленности.

Когерентный метод – по сути, является разновидностью эхо-импульсного метода. Помимо двух основных параметров эхо-сигнала, таких как амплитуда и время прихода, дополнительно используется фаза эхо-сигнала.

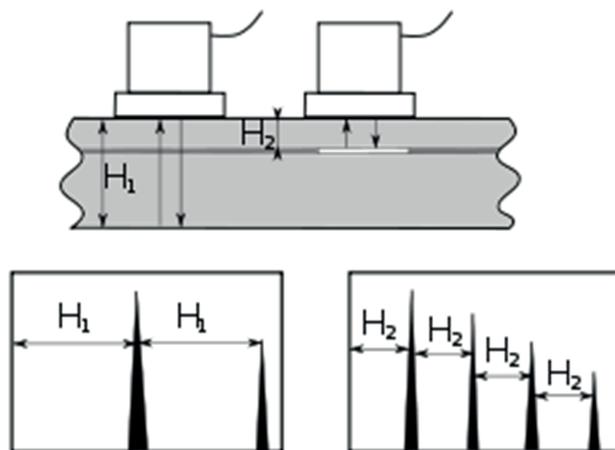


Рисунок 5.4 – Ревербационный метод контроля двухслойной конструкции

Использование специальных преобразователей, таких как преобразователь бегущей волны или его современный аналог – преобразователь с фазированной решёткой, а также применение данного метода к реальным объектам контроля пока еще находятся на стадии исследований.

Методы прохождения подразумевают наблюдение за изменением параметров ультразвуковых колебаний, прошедших через объект контроля, так называемых сквозных колебаний. Изначально для контроля применялось непрерывное излучение, а изменение его амплитуды сквозных колебаний расценивалось как наличие дефекта в контролируемом объекте, так называемой звуковой тени. Отсюда появилось название «теневого метод». Со временем непрерывное излучение сменилось импульсным, а к фиксируемым параметрам помимо амплитуды добавились также фаза, спектр и время прихода импульса и появились другие методы прохождения. Термин «теневого» потерял свой первоначальный смысл и стал означать один из методов прохождения.

Теневого – используются два преобразователя, которые находятся по две стороны от исследуемой детали на одной акустической оси. В данном случае один из преобразователей генерирует колебания (генератор), а второй принимает их (приёмник). Признаком наличия дефекта будет являться значительное уменьшение амплитуды принятого сигнала, или его пропадание (дефект создает акустическую тень).

Зеркально-теневого – используется для контроля деталей с двумя параллельными сторонами, развитие теневого метода: анализируются отражения от противоположной грани детали. Признаком дефекта, как и при теневого методе, будет считаться пропадание отраженных колебаний. Основное достоинство этого метода, в отличие от теневого, заключается в доступе к детали с одной стороны. На рисунке 5.5 показана вертикально ориентированная трещина, выявляемая зеркальным методом.

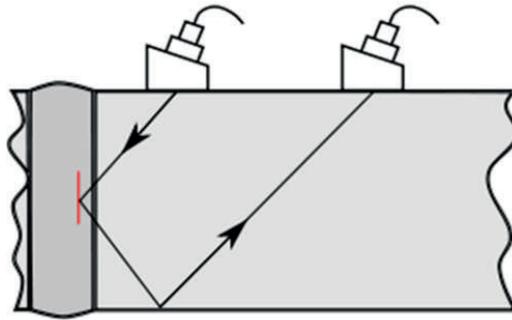


Рисунок 5.5 – Вертикально ориентированная трещина, выявляемая зеркальным методом

Временной теневой метод основан на запаздывании импульса во времени, затраченного на огибание дефекта. Используется для контроля бетона или огнеупорного кирпича.

Метод многократной тени аналогичен теневому, с тем исключением, что ультразвуковая волна несколько раз проходит через параллельные поверхности изделия.

При *эхо-сквозном методе* (рисунок 5.6) используют два преобразователя, расположенные по разные стороны объекта контроля друг напротив друга.

В случае отсутствия дефекта на экране дефектоскопа наблюдают сквозной сигнал и сигнал, двукратно отражённый от стенок объекта контроля. При наличии полупрозрачного дефекта также наблюдают отражённые сквозные сигналы от дефекта.

Эхо-сквозной метод контроля. При отсутствии дефекта на экране дефектоскопа наблюдаются только 1-й и 2-й импульсы. При наличии полупрозрачного дефекта, дополнительно 3 и 4-й. На рисунке для наглядности отражения

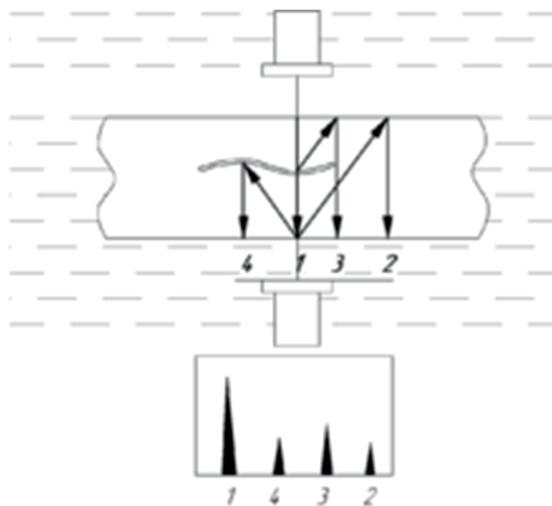


Рисунок 5.6 – Эхо-сквозной метод

ультразвуковых волн неверно показаны направления их распространения. Ультразвуковые волны распространяются вдоль акустической оси передатчика (верхнего преобразователя).

Ревербационно-сквозной метод включает в себя элементы ревербационного метода и метода многократной тени. На небольшом расстоянии друг от друга, как правило, с одной стороны изделия, устанавливают два преобразователя – передатчик и приёмник. Ультразвуковые волны, посылаемые в объект контроля после многократных отражений, в конечном счете, попадают на приёмник. Отсутствие дефекта позволяет наблюдать стабильные отраженные сигналы. При наличии дефекта изменяется распространение ультразвуковых волн – изменяется амплитуда и спектр принятых импульсов. Метод применяется для контроля многослойных конструкций и полимерных композитных материалов.

Велосимметрический метод основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Применяется для контроля многослойных конструкций и для изделий из полимерных композиционных материалов.

5.2. Технология ультразвукового контроля

На практике для оценки размеров и типа выявленного дефекта используют только те его характеристики, которые легко может измерить в любых условиях каждый оператор и выразить в простой числовой форме. Для оценки качества сварных швов обычно определяются следующие характеристики дефектов:

- амплитуда эхо-сигнала, пропорциональная площади проекции отражающей поверхности дефекта на плоскость, перпендикулярную оси ультразвукового пучка;
- условная протяженность, определяемая длиной зоны перемещения преобразователя вдоль шва, в пределах которой фиксируется эхо-сигнал от выявленного дефекта;
- условная высота, равная разности значений глубин залегания дефекта, измеряемых в крайних положениях наклонного преобразователя при перемещении его перпендикулярно оси шва (крайними являются те положения преобразователя, которые соответствуют появлению и исчезновению эхо-сигнала от дефекта на развертке дефектоскопа);
- число дефектов, приходящихся на единицу длины шва;
- координаты дефекта по сечению и длине шва.

Местоположение дефекта в сварном шве определяется следующими тремя координатами: H – глубина залегания дефекта, отсчитываемая по нормали к поверхности; X – расстояние от центра пучка излучателя до дефекта вдоль поверхности сварного соединения; L – расстояние вдоль оси шва от какой-либо выбранной точки отсчета до дефекта.

Глубиномерное устройство дефектоскопа измеряет интервал времени Δt между следованиями зондирующего импульса и эхо-сигнала от дефекта. Так

как скорости распространения ультразвуковых колебаний в металле и призме, а также углы ввода ультразвука обычно известны, то по значению Δt можно определить H и X .

В ультразвуковой дефектоскопии амплитуду эхо-сигнала от дефекта измеряют посредством его сравнения с каким-либо опорным сигналом, имеющим известные значения и форму и поступившим в тот же преобразователь от отражателя. Если вид обнаруженного дефекта известен заранее, то наиболее правильно сравнить эхо-сигнал от дефекта с сигналом от искусственного отражателя, форма которого наиболее близка к форме дефекта. Однако чаще всего невозможно достаточно уверенно распознать вид дефекта. Кроме того, его размер должен выражаться через какую-либо стандартизованную величину, воспроизводимую при любых измерениях, поэтому в целях унификации измерения амплитуды эхо-сигнала было введено понятие эквивалентной площади (или эквивалентного диаметра) дефекта.

Эквивалентная площадь дефекта считается равной площади искусственного отражателя (дна плоскодонного отверстия), расположенного на той же глубине, что и дефект, и обеспечивающего получение эхо-сигнала такой же амплитуды. Аналогично определяют эквивалентный диаметр. Общепринято, что при измерении эквивалентного размера дефекта по совмещенной схеме наклонным преобразователем ось плоскодонного отверстия совпадает с акустической осью пучка, а при измерении его отдельно совмещенным преобразователем (РС-преобразователем) ось отверстия перпендикулярна плоскости дна.

Существуют два способа измерения эквивалентного размера дефектов: с помощью тест-образцов и с помощью специальных акустических диаграмм, полученных экспериментально или на основе расчетов. Первый способ состоит в том, что эхо-сигнал от дефекта последовательно сравнивается с сигналами от плоскодонных отверстий разных размеров, изготовленных в тест-образце на той же глубине, на которой расположен дефект. Тест-образец представляет собой копию контролируемого сварного соединения. Все операции по измерению эквивалентного размера дефекта сводятся к нахождению отверстия, от которого исходит эхо-сигнал, равный эхо-сигналу от дефекта.

К основным достоинствам данного способа относятся его простота и доступность. Его недостаток – необходимость изготовления большого числа образцов с широким набором плоскодонных отражателей, отличающихся друг от друга диаметром и глубиной расположения. Кроме того, качество поверхности и акустические свойства тест-образца должны полностью соответствовать аналогичным характеристикам контролируемого сварного соединения.

Второй способ измерения эквивалентного размера дефекта базируется на использовании специальных акустических диаграмм, связывающих для данного преобразователя между собой амплитуду эхо-сигнала, эквивалентный размер плоскодонного отражателя и расстояние до него. По оси ординат такой диаграммы откладывается относительная амплитуда эхо-сигнала, представляющая собой

отрицательную величину, выраженную в децибелах, а по оси абсцисс – глубина залегания дефекта. Выбор угла наклона координатной сетки определяется затуханием ультразвука в сварном соединении. Данная диаграмма обеспечивает хорошо отработанный универсальный способ решения всех практических задач измерения эквивалентных размеров дефектов и настройки чувствительности дефектоскопа. Для удобства практического ее использования разработаны и применяются линейки разной конструкции со шкалами, нанесенными в соответствии с акустическими диаграммами.

В практике ультразвукового контроля распространен также способ оценки дефектов на поверхности сварного соединения посредством измерения их условных размеров. Суть этого способа состоит в том, что при перемещении преобразователя по поверхности детали вдоль дефекта измеряются расстояния между его положениями, в которых при заданном уровне чувствительности дефектоскопа эхо-импульс от дефекта исчезает с экрана.

Схема измерения условной высоты ΔH и условной протяженности ΔL дефекта наклонным преобразователем показана на рисунке 5.7.

Условные размеры превышают действительные размеры дефекта вследствие того, что ультразвуковой пучок имеет значительное расхождение, увеличивающееся с расстоянием от излучателя. Следовательно, значения ΔL и ΔH зависят от расстояния удаления излучателя от дефекта.

Определение условной высоты небольших по сравнению с пьезоэлементом дефектов, связанное со значительными измерительными погрешностями, фактически не дает новой информации о размерах дефекта. Однако условную высоту целесообразно измерять всегда дополнительно к амплитуде, чтобы не пропустить какой-либо крупный плоскостной дефект (трещину) с низкой отражательной способностью.

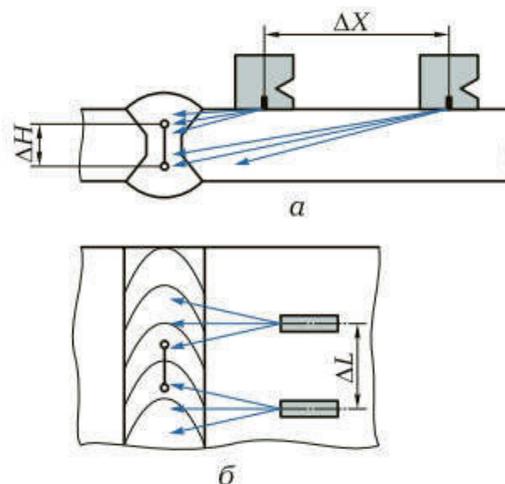


Рисунок 5.7 – Схемы измерения условной высоты ΔH (а) и условной протяженности ΔL (б) дефекта: ΔX – расстояние между излучателем и дефектом

При контроле сварных соединений преобразователи устанавливают по обе стороны сечения и дополнительно измеряют разницу во времени поступления сигналов, диафрагмировавших на концах трещины, в каждый преобразователь. Этот метод позволяет также определить наклон трещины в вертикальной плоскости, но он очень трудоемкий и требует высокой квалификации операторов.

Глубину трещин, выходящих на поверхность, оценивают по времени распространения поверхностной волны между излучателем и приемником. При использовании временных методов глубина трещины определяется разницей во времени поступлений сигнала, вызванного поверхностной волной, в каждый преобразователь.

Выполнение контроля при произвольном уровне чувствительности дефектоскопа может привести к регистрации эхо-сигналов от мелких неопасных дефектов и структурных неоднородностей либо к пропуску опасных дефектов, поэтому дефекты следует выявлять при строго определенном уровне чувствительности. Чтобы установить заданный уровень предельной (или контрольной) чувствительности дефектоскопа, его настраивают по образцу, представляющему собой копию сварного шва, в котором выполнено плоскодонное отверстие или другой отражатель. Эквивалентная площадь отражателя регламентируется соответствующим нормативным документом. Выбор типа отражателя осуществляется в соответствии с его отражательными свойствами, технологичностью и воспроизводимостью характеристик при изготовлении.

На практике используются следующие эталонные отражатели: боковой цилиндрический, угловой, сегментный и в виде плоскодонного отверстия, которые относительно легко изготавливаются, имеют простую форму и, что самое главное, эхо-сигналы от этих отражателей пропорциональны их площадям.

По форме дефекты сварных швов подразделяются на две группы: объемные с округлыми краями и плоскостные с острыми краями, которые являются концентраторами значительных напряжений. Плоскостные дефекты существенно более опасны при эксплуатации сварных конструкций, чем объемные, поэтому любой метод дефектоскопии должен обеспечивать распознавание типа дефекта. При ультразвуковом контроле для этого необходимо проанализировать несколько информативных признаков с учетом того, что плоскостные дефекты отражают ультразвук направленно, т. е. преимущественно в каком-либо одном направлении, а объемные – приблизительно равномерно по всем направлениям.

Наиболее достоверные результаты определения типа дефектов получают в случае измерения коэффициента его формы K_ϕ . Согласно определению коэффициент

$$K_\phi = A_o/A_3, \quad (5.1)$$

где A_o , A_3 – амплитуды сигналов, соответственно отраженного от дефекта обратно к преобразователю и дважды зеркально отраженного (от дефекта и внутренней

поверхности сварного соединения ко второму преобразователю, включенному по схеме «тандем»).

Установлено, что с вероятностью 0,95 у плоскостных дефектов (трещин, непроваров) $K_{\phi} < 1$, а у объемных (пор, включений) $K_{\phi} > 1$. В сварных швах небольшой толщины K_{ϕ} измеряют, располагая преобразователи под углом друг к другу.

Перспективным методом определения типа дефекта является ультразвуковая спектрометрия, основанная на исследовании спектров эхо-сигналов, отраженных от дефектов разных типов при варьировании частоты ультразвуковых колебаний зондирующих импульсов.

Принятые при таком «прозвучивании» эхо-сигналы обрабатываются и изображаются на экране спектрального анализатора в виде отдельных импульсов, высота которых пропорциональна амплитуде эхо-сигнала, а положение на развертке – частоте. У объемных дефектов частотный спектр носит монотонный характер, а у плоскостных – гребенчатый с периодическими максимумами и минимумами.

5.2.1. Способы контроля

Используемая методика ультразвукового контроля должна обеспечивать выявление любых недопустимых дефектов по всему сечению сварного шва и околошовной зоны. Выбор типа преобразователя, параметров и схемы контроля шва определяется особенностями конструкции сварного соединения и базируется на вероятностно-статистических характеристиках распределения дефектов по сечению шва, по типам дефектов и их ориентации относительно оси шва. В свою очередь, эти характеристики определяются типоразмером сварного шва и технологией сварки.

Анализ распределения дефектов, встречающихся в разных зонах сечения шва, позволяет выделить те зоны, которые нуждаются в наиболее тщательном контроле, а также выработать рекомендации по изменению конструкции соединения в целях обеспечения возможности «прозвучивания» всего металла шва. Такой подход (от изучения характеристик реальных дефектов к разработке методики контроля) является наиболее правильным и обеспечивает высокую достоверность результатов контроля.

Для контроля сварных швов применяют «прозвучивание» прямым лучом, прямым и однократно отраженным лучом, многократно отраженным лучом, по слоям (все эти способы основаны на совмещенной схеме включения преобразователя в дефектоскоп), а также эхо-зеркальный метод «тандем», зеркально-теневой и теневой методы.

При «прозвучивании» стыковых сварных швов прямым лучом (рисунок 5.8, а) преобразователь перемещают в околошовной зоне между валиком шва и точкой, удаленной от оси шва на расстояние:

$$X_2 = 2\delta \operatorname{tg} \alpha + e / 2, \quad (5.2)$$

где δ , e – соответственно толщина и ширина шва.

Данный способ контроля наиболее помехоустойчив: при его использовании наблюдается минимум ложных эхо-сигналов от каких-либо элементов конструкции в зоне соединения (приварных косынок, штуцеров и др.). Это единственный способ, пригодный для «прозвучивания» швов толщиной 3,5...10,0 мм, выполненных односторонней сваркой с проплавлением, в которых дефекты находятся в основном в корне шва.

Недостатком этого способа контроля является наличие «мертвой зоны», вызванное тем, что преобразователь упирается в валик шва. Для ее уменьшения верхнюю часть шва целесообразно «прозвучивать» с помощью преобразователей, имеющих большие углы ввода ультразвука.

Контроль *прямым и однократно отраженным лучом* (рисунок 5.8, б) осуществляется при перемещении преобразователя в околошовной зоне. Этот способ позволяет выполнять контроль с одной стороны сварного соединения. Преобразователь перемещают до линии, отстоящей от оси шва на расстояние X_2 , определяемое по приведенной ранее формуле.

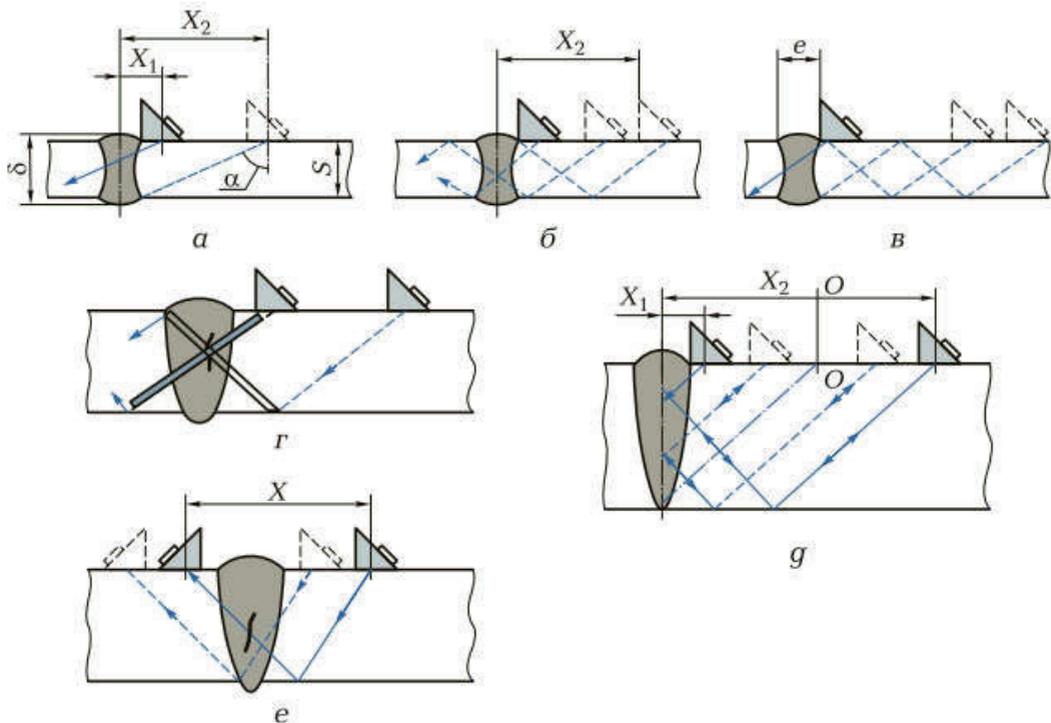


Рисунок 5.8 – Схемы «прозвучивания» стыковых сварных швов: а – прямым лучом; б – прямым и однократно отраженным лучом; в – многократно отраженным лучом; г – по слоям; д – эхо-зеркальным методом «тандем»; е – зеркально-теньевым методом; X – расстояние между преобразователями; X_1, X_2 – расстояния от оси шва до осей преобразователей в их крайних положениях; e – ширина шва; S – толщина металла; α – угол между осью излучателя и поверхностью контролируемой детали; δ – толщина шва; О–О – плоскость, разделяющая зоны перемещения преобразователей

Контроль *многократно отраженным лучом* (рисунок 5.8, в) сопровождается большим числом ложных сигналов от валика шва и является наименее помехоустойчивым. Возможность его применения ограничивается случаями, когда отсутствует доступ непосредственно к шву, например в стыковом соединении, с обеих сторон закрытом приварными накладками.

Контроль *по слоям* (рисунок 5.8, г) обеспечивает наибольшую достоверность результатов, но его рекомендуется применять при толщине швов не менее 40 мм. «Прозвучивание» по слоям осуществляется любым из рассмотренных ранее способов, а эхосигналы от дефектов, расположенных в разных слоях сварного соединения, фиксируются только на определенном участке развертки.

Эхо-зеркальный метод контроля «тандем» (рисунок 5.8, д) заключается в одновременном «прозвучивании» шва двумя преобразователями, расположенными с одной стороны шва друг за другом и синхронно перемещающимися в разные стороны относительно плоскости О–О.

При таком перемещении преобразователей сумма расстояний X_1 и X_2 , а также время поступления в приемник сигналов, зеркально отраженных от дефектов и обратной стороны сварного соединения, постоянные для данной толщины шва. Это облегчает контроль, так как эхо-сигнал от любого дефекта находится на фиксированном участке развертки, где можно установить метку (строб-импульс) и обеспечить звуковую индикацию дефекта.

Преобразователи могут включаться по отдельной или отдельно-совмещенной схеме. В последнем случае дополнительно регистрируются эхо-сигналы, отраженные обратно к каждому преобразователю.

Зеркально-теневой (рисунок 5.8, е) и *теневой методы* рекомендуются только для выявления относительно грубых дефектов. «Прозвучивание» здесь осуществляется двумя преобразователями, включенными по отдельной схеме. Преобразователи установлены по обе стороны шва навстречу друг другу и закреплены с помощью какого-либо приспособления (расстояние между ними равно X). О наличии дефекта судят по отсутствию сигнала в стробимпульсе. Данный способ перспективен для контроля швов, выполненных сваркой трением и контактной сваркой давлением.

5.2.2. Особенности контроля

Сварные швы контролируются с одной (при толщине основного металла до 50 мм) или с обеих сторон соединения. Контроль выполняется после внешнего осмотра и устранения выявленных при этом недопустимых поверхностных дефектов. Непосредственно перед контролем подготовленную поверхность околошовной зоны тщательно протирают ветошью и покрывают слоем контактного смазочного материала. Наиболее целесообразно использовать для этого минеральные масла (автолы, компрессорные масла и др.).

Поиск дефектов в шве производится при несколько завышенной чувствительности дефектоскопа посредством продольнопоперечного перемещения

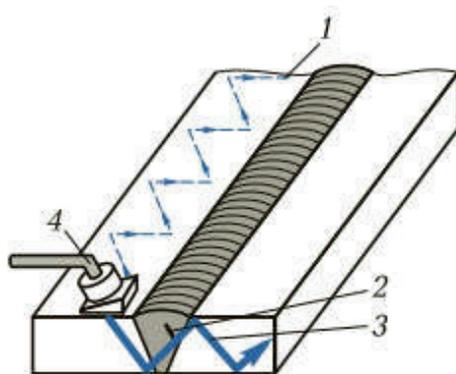


Рисунок 5.9 – Схема ультразвуковой диагностики сварного шва при наличии в нем трещины: 1 – траектория преобразователя; 2 – трещина; 3 – звуковая волна; 4 – преобразователь

преобразователя 4 по всей контролируемой зоне сначала с одной стороны шва, а затем с другой (рисунок 5.9). Шаг продольного перемещения преобразователя должен составлять не более половины диаметра пьезоэлемента. В процессе перемещения наклонный преобразователь необходимо непрерывно поворачивать вокруг его оси на $\pm 15^\circ$ для обнаружения дефектов с разной ориентацией. Контакт преобразователя с поверхностью контролируемого сварного соединения обеспечивается легким нажатием на него рукой.

При появлении эхо-сигналов от дефекта на рабочем участке развертки зону перемещения преобразователя сокращают и производят измерение информативных характеристик: координат, амплитуды эхо-сигнала, условной высоты и протяженности дефекта, коэффициента его формы K_ϕ и числа дефектов на стандартном участке шва.

Нормы оценки качества сварных соединений разных типов составляются с учетом информации, получаемой при ультразвуковом контроле, на основе норм Ростехнадзора, требований СНиП и других действующих нормативных документов, определяющих их качество. Ультразвуковой контроль швов при сварке из углеродистых и низколегированных сталей малой толщины (до 15 мм) наиболее эффективен при использовании преобразователей с большими углами призмы ($\beta = 53 \dots 56^\circ$, частота сигнала $f = 5$ МГц).

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан наклонный РС-преобразователь типа РСМП с повышенным отношением сигнал/помеха, обеспечивающий уверенное выявление круглых дефектов размером 0,7 мм и более.

При толщине стали 15...30 мм швы, выполненные односторонней сваркой, контролируют прямым и однократно отраженным лучом с использованием одного преобразователя. Наиболее эффективен в этом случае стандартный преобразователь ($\beta = 50^\circ$, $f = 2,5$ МГц). Если возникает ложный эхо-сигнал от провисания шва, то в целях повышения надежности и помехоустойчивости контроль

целесообразно производить отдельно в корневой и остальной части шва. При этом верхнюю часть шва предпочтительно контролировать преобразователем с $\beta = 40^\circ$.

Односторонние сварные швы листовых конструкций без подварки корня, как правило, имеют весьма низкое качество. При сварке образуется провисание шва значительных размеров (3...5 мм). Контроль корневой зоны таких швов возможен только после удаления всех неровностей поверхности шлифовальной машинкой.

При толщине стали 30...200 мм швы, выполненные двухсторонней или односторонней с подваркой корня сваркой, контролируют наклонными преобразователями с $\beta = 30$ и 40° на частотах 1,8 и 2,5 МГц. Статистика контроля показывает, что в этих швах распределение дефектов по видам следующее: 65...70 % – шлаковые включения, 10 % – поры и 20...25 % – плоскостные дефекты (из них 5...7 % – трещины).

Наиболее опасные дефекты – трещины и непровары – ориентированы преимущественно в вертикальной плоскости. Такие дефекты, расположенные в сечении шва, плохо выявляются при однощуповой схеме «прозвучивания». Для их обнаружения необходимо применять схему «тандем».

Сварные швы при толщине стали более 200 мм необходимо контролировать на пониженных частотах (1,0...1,25 МГц) и, что особенно важно, после термообработки, если она предусмотрена технологией. Благодаря термообработке измельчается зерно и возрастает степень однородности структуры, что уменьшает затухание ультразвука в шве и околошовной зоне и повышает достоверность контроля. Так, например, при контроле швов после термообработки число выявленных дефектов увеличивается на 20...25 %. Контроль до термообработки необязателен.

Весьма специфической задачей ультразвукового контроля сварных соединений является обнаружение поперечных трещин. Такие трещины возникают при грубых нарушениях сварочной технологии в сталях, склонных к трещинообразованию. Поперечные трещины располагаются в литом металле и в зоне термического влияния. Наиболее часто они появляются в корневой зоне швов, выполненных двухсторонней сваркой без подогрева. Поверхность поперечных трещин имеет малую шероховатость, и отражение ультразвука от них носит в основном зеркальный характер, что затрудняет их обнаружение.

Схема «прозвучивания» поперечных трещин одним преобразователем (рисунок 5.10, а) самая простая, но и наименее надежная. Применяется она для контроля швов при небольшой (до 20 мм) толщине основного металла.

Значительно более высокая чувствительность контроля достигается при использовании схемы с двумя преобразователями, расположенными под углом к шву (рисунок 5.10, б). Такое их размещение способствует регистрации максимального по амплитуде зеркально отраженного сигнала.

Для контроля швов, полученных при сварке металла большой толщины, применяют эхо-зеркальный метод «тандем» с размещением преобразователей на лицевой поверхности по обе стороны шва.

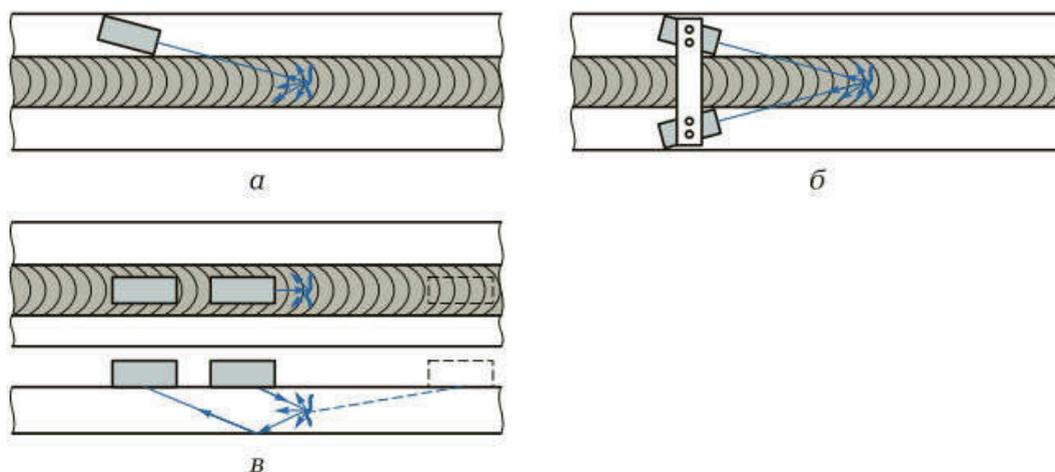


Рисунок 5.10 – Схемы «прозвучивания» поперечных трещин: а – одним преобразователем; б – двумя преобразователями; в – одним или двумя преобразователями при снятом валике лицевой поверхности шва

Приведенные схемы позволяют осуществлять контроль без снятия валика лицевой поверхности шва (что является их преимуществом), но требуют использования специальных приспособлений для крепления преобразователей. Следует отметить, что сравнительная эффективность применения той или иной схемы еще не установлена, поэтому на практике очень часто контроль швов производят одним или двумя преобразователями (рисунок 5.10, в), размещенными в одной плоскости, после снятия валика.

Ультразвук широко используется для контроля стыковых швов различных конструкций. Способ «прозвучивания» выбирают в соответствии с конфигурацией конструкции. Так, швы звеньев корабельных цепей контролируют по схеме «тандем» при размещении преобразователей с одной стороны шва симметрично оси звена. Стержни арматуры железобетонных конструкций имеют периодический профиль, что существенно усложняет контроль швов арматуры эхо-импульсным методом, так как в этом случае резко ухудшается акустический контакт и повышается уровень ложных сигналов, поэтому швы арматуры контролируют теньевым методом. О наличии и размерах дефекта судят по уменьшению амплитуды отраженного от него эхо-сигнала: степень ослабления амплитуды эхо-сигнала пропорциональна площади дефекта.

Наиболее эффективный контроль обеспечивается при вводе ультразвуковых колебаний через основной металл, что позволяет выявить все виды дефектов швов при минимальном уровне ложных сигналов.

Ложные сигналы возникают при отражении ультразвука от грубых неровностей валика шва, а в случае угловых соединений – от угла элемента конструкции. Ложные сигналы отличают от сигналов дефекта, разделяя их по времени поступления в преобразователь.

Для выявления непроваров в угловых и тавровых соединениях при наличии свободного доступа к ним со стороны вертикального листа применяют прямые или раздельно-совмещенные преобразователи. Иногда для контроля тавровых соединений используют сдвоенные наклонные преобразователи.

Примером применения преобразователей для выявления дефектов в тавровом соединении служит схема контроля шва (между стержнем и пластиной) закладной детали, приведенная на рисунке 5.11. Подобные детали широко применяются в строительстве.

В МГТУ им. Н. Э. Баумана разработана методика контроля закладных деталей. В этой методике, внедренной в производство на заводах железобетонных конструкций, контроль основан на использовании специального устройства для фиксации РС-преобразователей на детали.

Контроль нахлесточных соединений осуществляется зеркальнотеневым методом. В этом случае при отсутствии дефекта ультразвук беспрепятственно проходит от излучателя к приемнику, и на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) появляется сигнал. Если в соединении имеется дефект, то этот сигнал резко ослабляется или исчезает совсем. Для выполнения такого контроля необходимы специальные приспособления, закрепляющие преобразователи на определенном расстоянии друг от друга, зависящем от толщины соединенных деталей.

Ультразвуковые методы получают все более широкое распространение при контроле швов, выполненных контактной сваркой. Однако основные дефекты этих швов – оксидные пленки – выявляются ультразвуком плохо, поскольку имеют весьма малую ширину раскрытия (0,5...3,0 мкм) и гладкую поверхность, т. е. ультразвук от них практически не отражается. В случаях, когда оксидным пленкам сопутствуют включения или непровары, имеющие большую ширину раскрытия, основные дефекты швов, выполняемых контактной сваркой, ультразвуком обнаруживаются.

В контактных стыках рельсов эти дефекты швов надежно выявляются эхо-импульсным методом с одним преобразователем.

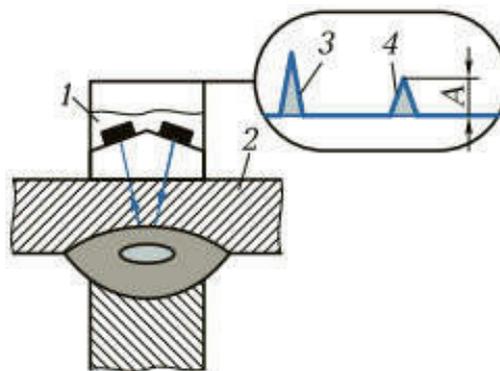


Рисунок 5.11 – Схема контроля шва закладной детали: 1 – устройство для фиксации РС-преобразователей; 2 – закладная деталь; 3 – падающий сигнал; 4 – сигнал, отраженный от дефекта; А – амплитуда отраженного сигнала

Наилучшие результаты контроля контактных стыков труб котлоагрегатов тепловых электростанций обеспечиваются при использовании эхо-зеркального метода.

Качество сварных точек контролируется зеркально-теневым методом. Признаком непровара между листами (детальями) в этом случае служит поступление донного сигнала от первого листа в приемный преобразователь. Размеры сварной точки можно определить, измерив расстояние между границами перемещения преобразователя по поверхности листа.

Недостатком зеркально-теневого метода контроля является невозможность выявления окисленного непровара, который почти полностью пропускает ультразвук в нижний лист. Этот недостаток устраняется при выполнении контроля эхо-импульсным методом по совмещенной схеме непосредственно в процессе сварки. Вследствие различия акустических сопротивлений жидкого и твердого металлов ультразвук при образовании расплавленного ядра между листами отражается от него. По промежутку времени от момента появления эхо-сигнала, свидетельствующего о начале формирования ядра, до выключения сварочного тока можно оценить размеры ядра.

Недостатками эхо-импульсного метода контроля являются его довольно сложная аппаратная реализация и наличие проблем при создании ультразвукового контакта вблизи сварочного электрода.

Наиболее перспективен теневой метод «прозвучивания» сварных соединений, при котором излучающий и приемный преобразователи встраиваются в электроды сварочной машины. При сжатии сварочных листов электродами излучаются непрерывные ультразвуковые колебания. В процессе расплавления металла ультразвук сильно поглощается в нем, и амплитуда прошедшего сигнала уменьшается, а после застывания металла амплитуда сигнала возрастает. По перепаду амплитуд сигнала судят о качестве сплавления листов. При таком контроле наиболее эффективно применение поперечных волн, так как они не проходят через жидкий металл, и в этом случае перепад амплитуд, определяющий точность метода, наибольший.

До сих пор рассматривались методы контроля сварных швов в соединениях из углеродистых и низколегированных сталей. Однако с каждым годом в производстве расширяется использование алюминиевых и медных сплавов, высоколегированных сталей и других конструкционных материалов, ультразвуковой контроль которых имеет свои особенности.

Для алюминиевых сплавов характерно слабое затухание ультразвука, что позволяет контролировать их обычными методами.

Контроль соединений из высоколегированных сталей и медных сплавов весьма затруднен, поскольку сварные швы этих металлов отличаются крупнозернистой упругоанизотропной структурой, в которой ультразвуковой сигнал значительно ослабляется и создает ложные сигналы отражения от границ зерен. При контроле таких швов приходится в 2–3 раза снижать частоту ультразвуковых

колебаний, что ограничивает возможность выявления малых дефектов. Однако в ряде случаев и эта мера не обеспечивает положительных результатов, и ультразвуковой контроль обычным дефектоскопом осуществить невозможно. В настоящее время разрабатываются специальные дефектоскопы для контроля крупнозернистых материалов. Выполняемый с их помощью контроль будет основан на статистическом анализе полезных сигналов от дефекта и ложных – от структуры.

5.3. Аппаратура для ультразвукового контроля

Обнаружение и измерение имеющихся в конструкции дефектов осуществляются с помощью ультразвуковых дефектоскопов специального или общего назначения. Дефектоскоп – это электронный блок, предназначенный для генерирования зондирующих импульсов высокочастотного напряжения, усиления и преобразования эхо-сигналов, отраженных от дефекта, а также для наглядного отображения амплитудно-временных характеристик эхо-сигналов на экране электронно-лучевой трубки. Структурная схема импульсного ультразвукового эхо-дефектоскопа общего назначения приведена на рисунке 5.12.

Импульс ультразвуковых механических колебаний, посылаемых в контролируемое изделие, создается в пьезопреобразователе за счет обратного пьезоэффекта. Для этого на пьезоэлемент пьезопреобразователя подается короткий электрический импульс, вырабатываемый генератором зондирующих импульсов. Отраженный от донной поверхности или от дефекта механический импульс УЗК

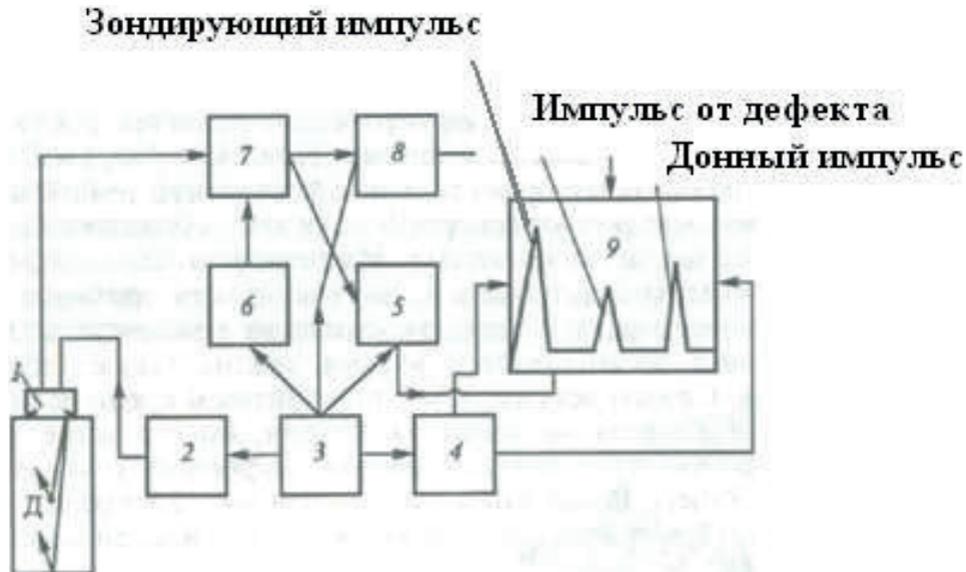


Рисунок 5.12 – Схема ультразвукового дефектоскопа: 1 – пьезопреобразователь; 2 – генератор зондирующих импульсов; 3 – синхронизатор; 4 – генератор горизонтальной развертки; 5 – глубиномер; 6 – блок временной регулировки чувствительности; 7 – усилитель; 8 – автоматический сигнализатор дефектов; 9 – экран дефектоскопа

принимается тем же или другим пьезопреобразователем, работающим в режиме приема, и преобразовывается посредством прямого пьезоэффекта в электрический сигнал. Далее сигнал, усиленный с помощью усилителя, подается на вертикальные отклоняющие элементы экрана, определяющие положение луча на экране дефектоскопа по высоте.

Одновременно с генератором зондирующих импульсов запускается генератор развертки, который вырабатывает линейно увеличивающийся (пилообразный) импульс, подаваемый на горизонтальные отклоняющие элементы экрана, для развертки луча в горизонтальной плоскости. Сигналы, поступившие от дефекта (Д) или противоположной стороны изделия (донный сигнал), вместе с зондирующим импульсом появляются на экране дефектоскопа в виде пиков соответствующей амплитуды. Положение этих пиков на горизонтальной оси определяется временем их прихода и зависит от скорости ультразвуковых колебаний в контролируемом изделии, а также глубины залегания дефекта или толщины изделия. С помощью глубиномера по времени прихода импульса и известной скорости распространения колебаний определяются соответственно глубина расположения дефектов и толщина изделия.

Автоматический сигнализатор дефектов служит для выработки звукового или светового сигнала при появлении импульса от дефекта выше браковочного уровня. Для компенсации затухания колебаний и выравнивания амплитуд импульсов от равных по размерам, но расположенных на разной глубине дефектов, служит блок временной регулировки чувствительности. Синхронизатор обеспечивает синхронную работу генератора зондирующих импульсов и генератора развертки, а также управляет работой блоков автоматического сигнализатора дефектов, временной регулировки чувствительности и глубиномера.

Современные ультразвуковые дефектоскопы позволяют получать на экране различные типы разверток, что существенно повышает информативность результатов контроля (рисунок 5.13). При применении способа А по горизонтальной оси экрана катодно-лучевой трубки определяют расстояние до исследуемого дефекта. О дефектах судят по импульсам, расположенным перпендикулярно этой оси, а глубину залегания дефекта определяют по расстоянию от исходного сигнала.

По способу В горизонтальное перемещение сигнала катодно-лучевой трубки осуществляют передвижением преобразователя. При этом вертикальному отклонению соответствует путь, пройденный звуком в материале. Таким образом, удастся выявить глубину расположения дефекта и одновременно его длину.

Способом С получают изображения с каждого выявленного в детали дефекта, перемещая преобразователь по всей боковой поверхности. Благодаря этому можно дать полную характеристику внутреннего дефекта, а также определить его действительное положение в материале.

Наряду с перечисленными выше элементами, неотъемлемой составной частью современных дефектоскопов является высокопроизводительный микропроцессор и соответствующее программное обеспечение. Ультразвуковые

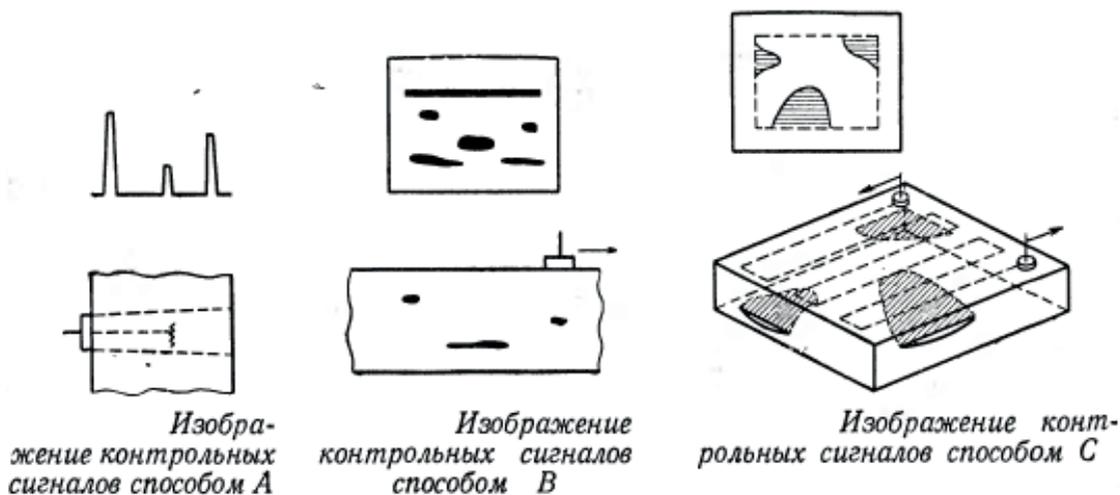


Рисунок 5.13 – Различные исследования методом импульсного отражения

дефектоскопы последнего поколения, созданные на базе микропроцессорной техники, обладают большими функциональными возможностями. Их электронные и дефектоскопические параметры очень близки, так как во всех приборах используются практически одни и те же электронные компоненты. Помимо функциональных возможностей весьма важны также габариты и масса прибора. Самым легким и малогабаритным среди дефектоскопов общего назначения не только в России, но и в мире, на сегодняшний день является отечественный цифровой ультразвуковой дефектоскоп общего назначения А1212 (рисунок 5.14).

Настройка уровня поисковой и браковочной чувствительности, а также эталонирование основных параметров ультразвуковых дефектоскопов осуществляются с помощью соответствующих стандартных образцов по ГОСТ 14782–86 или специальных стандартных образцов предприятий, с искусственными отражателями, имитирующими дефекты.

Аппаратура, предназначенная для ультразвукового контроля, также включает в себя преобразователь с пьезоэлементом, излучающим и принимающим ультразвуковые колебания, электронный блок (собственно дефектоскоп) и различные вспомогательные устройства.

Различают три основных типа ультразвуковых преобразователей:

- прямые (рисунок 5.15, а) – излучающие в сварное соединение продольные волны перпендикулярно контактной поверхности (поверхности ввода ультразвуковых колебаний);



Рисунок 5.14 – Ультразвуковой дефектоскоп А1212

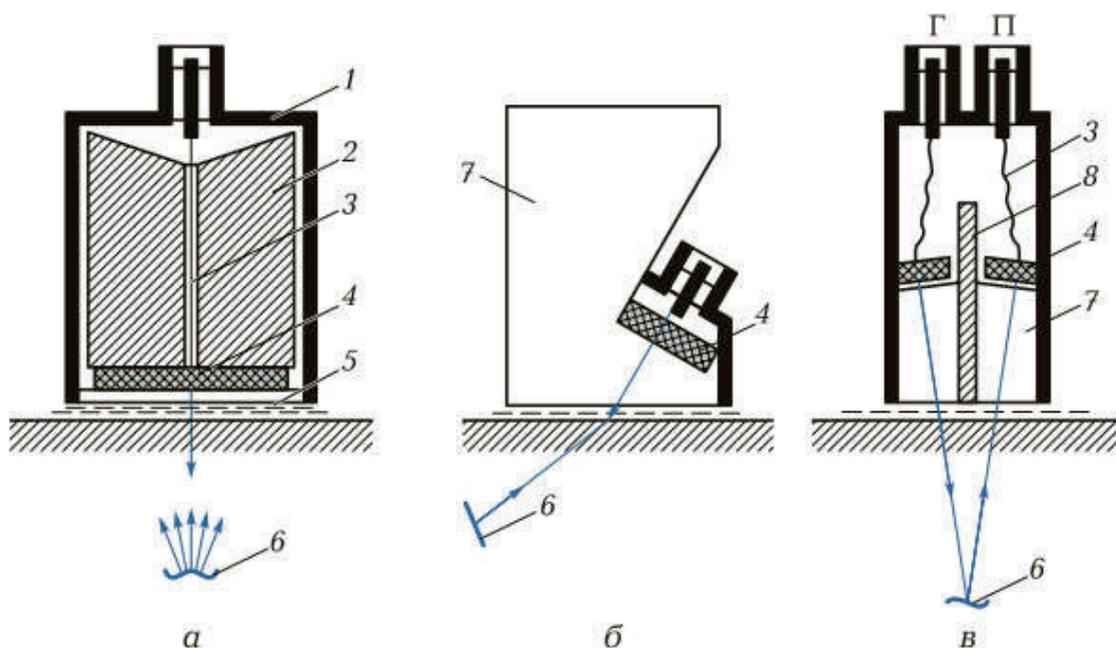


Рисунок 5.15 – Ультразвуковые преобразователи разных типов: а – прямой; б – наклонный призматический; в – раздельно-совмещенный; 1 – корпус; 2 – демпфер; 3 – токоподвод; 4 – пьезопластина; 5 – защитное доньшко; 6 – дефект; 7 – призма; 8 – акустический экран; Г – генератор зондирующих импульсов; П – приемник

- наклонные, или призматические (рисунок 5.15, б) – излучающие в металл поперечные волны под углом к поверхности ввода;
- раздельно-совмещенные (рисунок 5.15, в) – обеспечивающие поступление в металл продольных волн под углом $80...85^\circ$ к поверхности ввода.

Основным элементом этих преобразователей является пьезоэлемент в виде диска или прямоугольной пластины толщиной, равной половине длины волны излучаемых ультразвуковых колебаний.

С рабочей стороны прямых преобразователей на пьезопластине 4 имеется защитное доньшко (протектор) 5, предохраняющее ее от механических повреждений. С противоположной стороны к пьезопластине приклеен демпфер 2 из материала, хорошо поглощающего ультразвук. Демпфер снижает длительность колебания пьезопластины, т. е. способствует получению коротких зондирующих импульсов. Прямой преобразователь размещен в стальном корпусе 1.

В наклонных и раздельно-совмещенных преобразователях пьезопластина приклеена к призме 7 из оргстекла, полистирола или других материалов, в которых ультразвук распространяется с небольшой скоростью, что позволяет при относительно малых углах падения поперечных волн вводить их в контролируемый металл под большими углами (до 90°). Сильное затухание ультразвука в призме обеспечивает быстрое гашение ультразвуковых колебаний, отраженных от границы контролируемого металла.

Прямые и наклонные преобразователи действуют в основном по совмещенной схеме, в которой один и тот же пьезоэлемент является и излучателем, и приемником ультразвуковых колебаний.

В раздельно-совмещенных преобразователях одна пьезопластина подключена к генератору электрических колебаний и служит излучателем ультразвуковых колебаний, а другая – к приемнику. Между ними установлен акустический экран 8.

В зависимости от толщины слоя контактной жидкости между защитным донышком и сварным соединением различают преобразователи:

- контактные – с толщиной слоя жидкости, существенно меньшей длины волны ультразвука;
- щелевые – с толщиной слоя жидкости, соизмеримой с длиной волны ультразвука;
- иммерсионные – с контактным слоем значительной толщины. Выбор типа преобразователя по способу создания акустического контакта зависит от качества поверхности контролируемого сварного соединения. Например, для контроля соединений с грубой поверхностью (допустим, после пескоструйной обработки) целесообразно использовать щелевой преобразователь.

Эффективно также применение преобразователей с протектором, выполненным из эластичного материала, например полиуретана, или в виде гидравлической подушки с резиновой оболочкой (иммерсионной лекальной ванны), обеспечивающей надежный акустический контакт.

6. РАДИАЦИОННЫЙ МЕТОД

Радиационный контроль – это вид неразрушающего метода контроля, основанный на взаимодействии проникающего ионизирующего излучения с контролируемым объектом. Система радиационного контроля состоит из четырех основных элементов: источника излучения, объекта контроля, детектора излучения, средства расшифровки и оценки результатов контроля. Свойства элементов системы контроля, которые влияют на результаты, называют характеристиками системы контроля или её параметрами.

Выявление внутренних дефектов основано на способности рентгеновских лучей и гамма-излучения проникать через различные материалы и поглощаться в них в разной степени в зависимости от толщины и вида материала, а также энергии излучения.

Для обнаружения внутренних дефектов в сварных швах по одну сторону контролируемого сварного соединения 3 (рисунок 6.1, а) устанавливают источник 1 излучения – рентгеновскую трубку или радиоактивный изотоп, а по другую – детектор 4, регистрирующий излучение, прошедшее через дефект 2. В качестве детектора могут использоваться: рентгеновская пленка, электроннооптический преобразователь, ксерорадиографическая пластина, фотобумага и т. д. Излучение от источника, проходя через сварное соединение, на дефектном и бездефектном его участках будет поглощаться по-разному и поступать в детектор с неодинаковой интенсивностью.

При прохождении через дефектные участки, содержащие газ или неметаллические включения, излучение ослабляется меньше, чем в сплошном металле. Разность интенсивностей излучения регистрируется детектором. Например, на уровне дефектного участка, где интенсивность I прошедшего излучения наибольшая (рисунок 6.1, б), рентгеновская пленка, используемая в качестве детектора, потемнеет сильнее.

Применение рентгеновской пленки лежит в основе радиографического метода дефектоскопии – наиболее распространенного из всех известных методов радиационного контроля.

Однако не всегда и не при любых условиях с помощью пленки можно обнаружить все возможные дефекты, находящиеся внутри просвечиваемого объекта. Существуют минимальные размеры выявляемых дефектов, характеризующие предельную чувствительность данного метода.

В радиографии различают два вида чувствительности. В соответствии с ГОСТ 7512–82 абсолютная чувствительность определяется минимальным размером выявляемого дефекта, или эталона чувствительности в направлении просвечивания. Относительная чувствительность характеризуется отношением

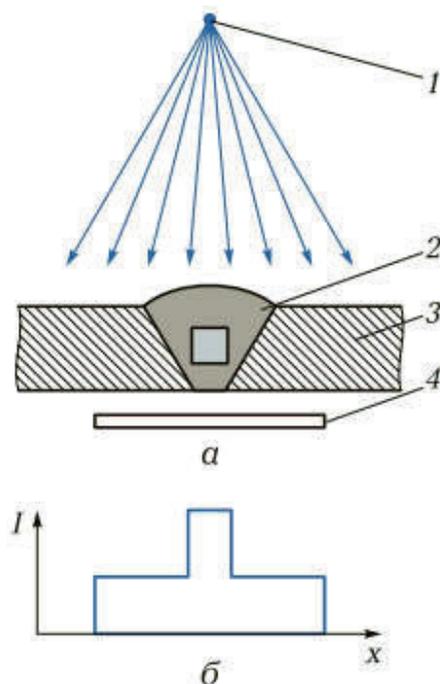


Рисунок 6.1 – Схема просвечивания сварного соединения (а) и распределение интенсивности излучения I , прошедшего через него (б): 1 – источник излучения; 2 – дефект; 3 – контролируемое соединение; 4 – детектор

минимального размера ΔS выявляемого дефекта в направлении просвечивания, к толщине S контролируемого соединения и выражается в процентах:

$$W = (\Delta S / S)100 . \quad (6.1)$$

Чувствительность радиографического метода контроля зависит от энергии первичного и рассеянного излучений, плотности и толщины просвечиваемого материала, формы и места расположения дефекта, а также от фокусного расстояния, размера и фокусного пятна рентгеновской трубки и типа рентгеновской пленки.

Свойства элементов системы контроля, которые влияют на результаты, называют характеристиками системы контроля или её параметрами.

К характеристикам источника излучения относятся:

- энергия и интенсивность излучения, размер активной части излучателя;
- объект контроля характеризуется толщиной и плотностью материала;
- характеристики детектора излучения – контрастность, чувствительность, эффективность и т. п.

Средства расшифровки и оценки результатов контроля обусловлены квалификацией и опытом дефектоскописта и совершенством технической документации. К параметрам системы радиационного контроля относятся также величины, характеризующие взаимное расположение элементов системы контроля

в пространстве и во времени, например, расстояние от источника излучения до детектора, время экспозиции и т. п.

Система радиационного контроля в целом также характеризуется величиной дефектов, выявляемых с заданной вероятностью и производительностью контроля. Требования к этим основным характеристикам зависят от требований к качеству контролируемых изделий.

6.1. Классификация радиационных неразрушающих методов контроля

По используемым видам ионизирующего излучения радиационный контроль подразделяется на:

- 1) рентгеновский контроль;
- 2) контроль моноэнергетическим β -излучением;
- 3) контроль тормозным излучением ускорителей электронов;
- 4) контроль потоком тепловых нейтронов;
- 5) γ -контроль;
- 6) контроль потоком протонов;
- 7) контроль немоноэнергетическим β -излучением радиоактивных изотопов;
- 8) контроль потоком позитронов.

В зависимости от задач, стоящих перед контролем, и вида изделия, наиболее эффективен тот или другой вид излучения. Так, для контроля сварных и паяных соединений эффективно использование 1–7-го видов излучений, для контроля слитков и отливок и обнаружения в них трещин, пор, рыхлот, ликваций – 1, 3, 5-й виды; неправильности формы внутренних закрытых полостей также уверенно обнаруживаются этими видами излучения. Микродетали, элементы электронной техники – дефекты пайки, обрывы и оплавление проводов обнаруживаются при применении 1, 2, 4, 6-го видов, а усталость материала (контроль деталей и узлов, бывших в эксплуатации) – 8-м видом.

Способы регистрации радиационных изображений подразделяются на три группы:

- радиографические (фотографический, ксерорадиографический, строборадиографический и т. п.);
- радиоскопические (способы радиационной интроскопии: визуальные радиационные, т. е. видение радиационных изображений на экране преобразователя, радиотелевизионные, стереорадиоинтроскопические);
- радиометрические (ионизационный; спектрометрический; сцинтилляционный).

Наибольшее распространение получили: рентгенография, рентгеноскопия и γ -контроль.

Для создания ионизирующего излучения используются рентгеновские аппараты, рентгеновские трубки (рисунок 6.2), ускорители заряженных частиц, радиоактивные изотопы.



Рисунок 6.2 – Рентгеновская трубка

Рентгеновские трубки служат источниками характеристического и тормозного излучений в широком диапазоне энергий (от 0,5 до 1000 кэВ). Их используют для просвечивания стальных листов, деталей до 120–160 мм.

Ускорители электронов являются источниками высокоэнергетического тормозного излучения (до 35 МэВ). Используются для просвечивания стальных листов большой толщины (>450 мм). Они служат также источниками β -излучения большой энергии и генераторами нейтронного потока.

Радиоактивные изотопы являются источником рентгеновских потоков нейтронов и позитронов, и используются для просвечивания стальных изделий толщиной до 200 мм.

Рентгеновская трубка

Рентгеновская трубка – электровакуумный прибор, служащий источником рентгеновского излучения. Такое излучение возникает при торможении электронов, испускаемых катодом, и их ударе об анод (антикатод); при этом энергия электронов, ускоренных сильным электрическим полем в пространстве между анодом и катодом, частично преобразуется в энергию рентгеновского излучения. Излучение рентгеновской трубки представляет собой наложение тормозного рентгеновского излучения на характеристическое излучение вещества анода. Рентгеновские трубки различают:

- по способу получения потока электронов – с термоэмиссионным (подогретым) катодом, автоэмиссионным (острийным) катодом, катодом, подвергаемым бомбардировке положительными ионами и с радиоактивным (b) источником электронов;
- по способу вакуумирования – отпаянные, разборные;
- по времени излучения – непрерывного действия, импульсные;
- по типу охлаждения анода – с водяным, масляным, воздушным, радиационным охлаждением;
- по размерам фокуса (области излучения на аноде) – макрофокусные, острофокусные и микрофокусные;

- по его форме – кольцевой, круглой, линейчатой формы;
- по способу фокусировки электронов на анод – с электростатической, магнитной, электромагнитной фокусировкой.

Наибольшее применение во всех областях находят отпаянные рентгеновские трубки с термоэмиссионным катодом, водоохлаждаемым анодом, электростатической системой фокусировки электронов (рисунок 6.3).

Термоэмиссионный катод рентгеновской трубки обычно представляет собой спираль или прямую нить из вольфрамовой проволоки, накаливаемую электрическим током. Рабочий участок анода – металлическая зеркальная поверхность – расположен перпендикулярно или под некоторым углом к потоку электронов. Для получения сплошного спектра рентгеновского излучения высоких энергий и интенсивности используют аноды из Au, W; в структурном анализе пользуются рентгеновские трубки с анодами из Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Ag.

Основные характеристики рентгеновских трубок:

- предельно допустимое ускоряющее напряжение (1–500 кВ);
- электронный ток (0,01 мА – 1 А);
- удельная мощность, рассеиваемая анодом (10–104 Вт/мм²);
- общая потребляемая мощность (0,002 Вт – 60 кВт);
- размеры фокуса (1 мкм – 10 мм). КПД р. т. составляет 0,1–3 %.

Катод при нагревании испускает электроны (происходит термоэлектронная эмиссия). Далее из-за большой разности потенциалов между катодом и анодом (десятки – сотни киловольт) поток электронов ускоряется и приобретает большую энергию. Полученный ускоренный пучок электронов попадает на положительно заряженный анод. Достигая анода, электроны испытывают резкое торможение, моментально теряя большую часть приобретённой энергии. При этом возникает тормозное излучение рентгеновского диапазона. В процессе торможения лишь около 1 % кинетической энергии электрона идёт на рентгеновское излучение, 99 % энергии превращается в тепло. Чтобы предотвратить перегрев анода, в мощных рентгеновских трубках применяют водное или масляное охлаждение и вращающийся анод. На рисунке 6.4 показано схематическое изображение рентгеновской трубки.

Рентгеновские трубки работают в режиме почти плоского диода, поэтому ток через трубку определяется законом степени трёх вторых (при неизменной температуре катода):

$$(I_a = K * U_a^{3/2}), \quad (6.2)$$

где I_a – ток анода; U_a – напряжение анода; K – коэффициент пропорциональности, индивидуальный для каждой лампы (трубки). Для регулировки тока через трубку управляют количеством испускаемых электронов, то есть, изменяя напряжение накала.

Типичные значения анодного напряжения в медицинских трубках для рентгенографии – 60...80 кВ, тока – десятки мА, таким образом, импульсная мощность

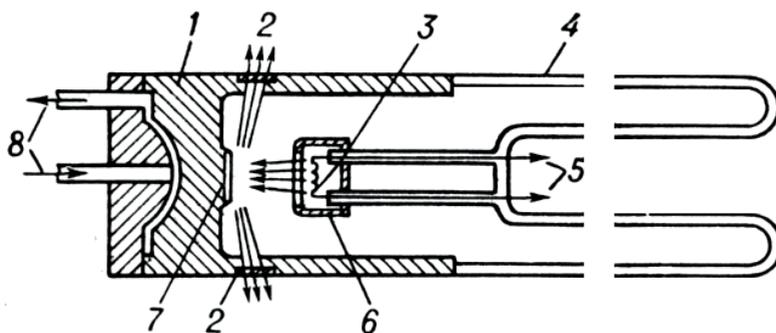


Рисунок 6.3 – Схема рентгеновской трубки для структурного анализа: 1 – металлический анодный стакан (обычно заземляется); 2 – окна из бериллия для выхода рентгеновского излучения; 3 – термоэмиссионный катод; 4 – стеклянная колба, изолирующая анодную часть трубки от катодной; 5 – выводы катода, к которым подводится напряжение накала, а также высокое (относительно анода) напряжение; 6 – электростатическая система фокусировки электронов; 7 – анод (антикатод); 8 – патрубки для ввода и вывода проточной воды, охлаждающей анодный стакан

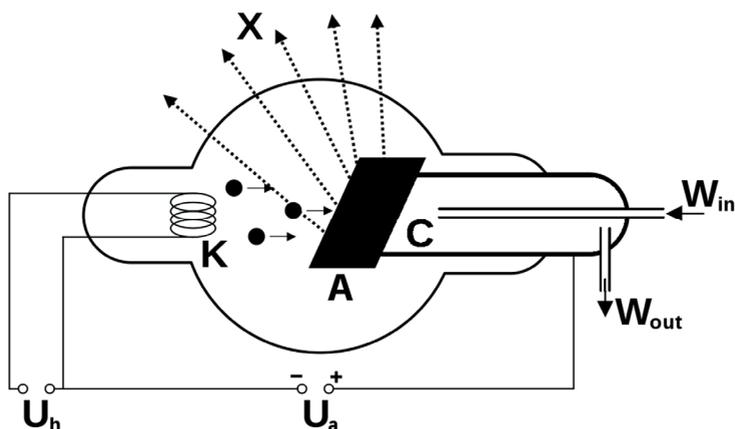


Рисунок 6.4 – Схематическое изображение рентгеновской трубки: X – рентгеновские лучи; K – катод; A – анод (иногда называемый антикатодом); C – теплоотвод; U_h – напряжение накала катода; U_a – ускоряющее напряжение; W_{in} – впуск водяного охлаждения; W_{out} – выпуск водяного охлаждения

составляет несколько кВт. При рентгенографии используется непрерывный режим работы при токе несколько мА. Для рентгенотерапии применяются трубки с анодным напряжением более 100 кВ для получения более жёсткого излучения.

На рисунке 6.5 представлен вид рентгеновской трубки БСВ2. Трубки БСВ применяются в промышленности для осуществления структурного анализа. Буква Б в названии означает – защита от излучения (в защитном кожухе), буква С – применяется для структурного анализа, буква В – водяное, отсутствие буквы – трубка с естественным охлаждением. Число 2 обозначает порядковый номер типа трубки.



Рисунок 6.5 – Рентгеновская трубка БСВ

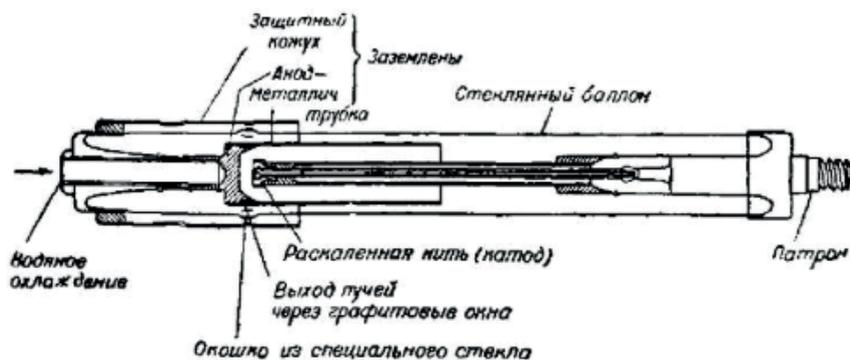


Рисунок 6.6 – Разрез рентгеновской трубки БСВ

Технические характеристики рентгеновской трубки БСВ:

- напряжение накала – от 0,4 до 5,6 В;
- ток накала – от 0,7 до 4,3 А;
- ток анода – не более 60 мА.

На рисунке 6.6 представлен разрез рентгеновской трубки БСВ.

Катод – вольфрамовый торированный, карбидированный прямого накала.

Фокус – линейный, кольцевой. Расход воды при температуре:

- +20 °С – от 3 до 12 л/мин;
- +50 °С – от 5 до 6 л/мин.

Относительная загрязненность спектра излучения побочными линиями – не более 0,5 %.

Долговечность – не менее 300 ч.

Наибольшая температура окружающей среды – +100 °С.

Варианты исполнения рентгеновских трубок в зависимости от вида приёмки:

- отдел технического контроля – ОТК;

- особо стойкие (особо стабильные) – ОС;
- приемка заказчика – ПЗ;
- военная приемка – ВП.

Стеклопанная рентгеновая трубка откачана до высокого вакуума. В трубку вделаны два электрода: массивный анод в виде медного стержня и катод в виде накаливаемой током вольфрамовой нити, окруженной фокусирующим цилиндром или чашечкой. В трубке сделаны четыре окошка из специального стекла, мало поглощающего рентгеновские лучи. На анодный конец трубки навинчивается стальной цилиндр с четырьмя отверстиями, устанавливающимися против окошек трубки. Через эти отверстия рентгеновские лучи выходят из трубки.

Принцип работы рентгеновской трубки заключается в следующем: нить катода накаливается током и выделяет электроны. Внутри трубки создается сильное электрическое поле, ускоряющее электроны в сторону анода. Попадая в зеркало анода – пластинку, напаянную на конец анодного стержня, электроны создают рентгеновские лучи, исходящие от анода и распространяющиеся во все стороны. Окошки трубки расположены с таким расчетом, чтобы пропустить наиболее интенсивную часть пучка лучей. Зеркало анода изготавливается из различных металлов.

В задачах рентгеноструктурного анализа, особенно требующих получения рентгенограмм с высоким разрешением, эффективность съемки зависит от размеров фокуса и, значит, определяется удельной мощностью трубки – мощностью, испускаемой единицей площади антикатада. Для таких условий предназначены острофокусные рентгеновские трубки БСВ и микрофокусная трубка.

Удельная мощность лампы БСВ может достигать 10 кВт/мм², так как чем меньше фокус, тем лучше теплоотвод и тем большие перегрузки можно допускать.

Проходящий через трубку ток измеряется миллиамперметром на пульте управления. Ток трубки регулируется изменением степени накала нити катода. Электроны, попадающие на мишень анода, тормозятся в ней и теряют скорость, а следовательно, и кинетическую энергию. Частично кинетическая энергия электронов превращается в лучистую энергию, которая выделяется в виде фотонов тормозного излучения, используемого при дефектоскопии изделий, а часть переходит в тепловую.

Доля кинетической энергии R (%), превращенной в рентгеновское излучение, зависит от анодного напряжения U и порядкового номера материала мишени Z :

$$R = 1,4 \times 10^{-7} Z U . \quad (6.3)$$

Для вольфрамовой мишени ($Z = 74$) при напряжении менее 100 кВ $R \approx 0,01$ %, при $U = 100$ кВ $R = 1$ %, а при $U = 2$ МВ – более 20 %. Большая часть энергии превращается в тепло, которое необходимо отводить от анода охлаждающей средой (масло, вода, газ). В некоторых случаях для уменьшения разогрева анода его выполняют вращающимся.

Участок мишени анода, на котором фокусируется рентгеновское излучение, называется действительным фокусным пятном трубки. Проекция его в направлении выхода лучей – эффективным фокусным пятном.

Фокусные пятна могут быть линейными с соотношением сторон 1:1,25 или круглыми. Трубки с фокусным пятном от 100 мкм до 1 мм – острофокусные, с пятном менее 100 мкм – микрофокусные.

Интенсивность излучения рентгеновской трубки можно регулировать анодным током и напряжением. При изменении тока (т. е. нагрева катода) меняется только интенсивность, а при изменении напряжения меняется и энергия излучения. Минимальная длина волны образующегося рентгеновского излучения соответствует максимальной энергии кванта. Энергия кванта тем больше, чем выше скорость электронов, которая определяется напряжением на трубке:

$$eU = hv = h(c / \lambda_0), \quad (6.4)$$

где e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$, Кл; U – напряжение на трубке, В; c – скорость света; λ_0 – наименьшая длина волны излучения в спектре рентгеновского излучения трубки. Из формулы видно, что энергетический спектр тормозного излучения определяется величиной напряжения на трубке. Чем выше напряжение, тем больше скорость электронов, тем больше энергия излучения, тем меньше длина волны и тем больше проникающая способность излучения.

Поскольку электроны, испускаемые катодом, имеют непрерывное распределение скоростей, энергетический спектр тормозного излучения имеет непрерывный характер, т. е. в нем присутствуют кванты со всевозможными значениями энергий – от нуля до некоторого максимального значения, отвечающего максимальной кинетической энергии тормозящихся электронов.

Если энергия электрона настолько велика, что он выбивает электроны с внутренних оболочек атомов вещества мишени, на фоне непрерывного спектра тормозного излучения возникает линейчатый спектр характеристического излучения (рисунок 6.7). Подбирая материалы мишени, можно получать различные спектры.

На рисунке 6.8 представлена спектральная интенсивность излучения трубки при различных напряжениях. Установлено, что длина волны излучения максимальной интенсивности $\lambda_{\max} = 32 \lambda_0$.

Ниже λ_0 излучения не существует. Как видно из формул, энергия излучения зависит только от напряжения, от величины анодного тока она не зависит.

Существуют различные модификации конструкции рентгеновской трубки. Двухэлектродные трубки (с напряжением $U \leq 200\text{--}300$ кВ) имеют электрическую фокусировку электронов, при которой размер фокусного пятна не изменяется во всем диапазоне регулировки анодного тока и напряжения. Трубки с вынесенным анодом, используемые для панорамного просвечивания, имеют дополнительную магнитную фокусировку. При напряжениях от 300 кВ до 2 МВ применяют секционированные (каскадные) трубки, которые имеют дополнительные промежуточные кольцевые электроды, обеспечивающие выравнивание электрического поля

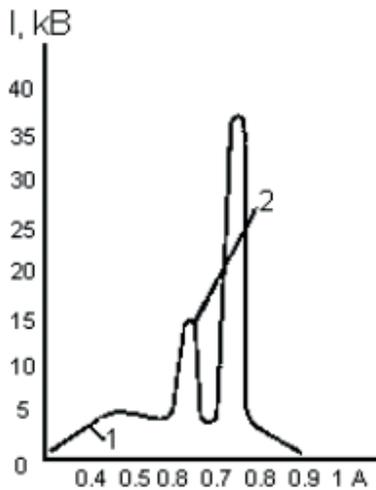


Рисунок 6.7 – Сплошной (1) и линейчатый (2) спектры рентгеновского излучения для мишени из молибдена при $U = 35\text{кВ}$

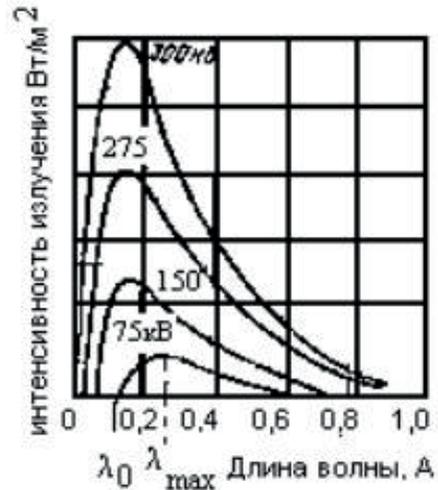


Рисунок 6.8 – Спектры тормозного рентгеновского излучения при различных напряжениях

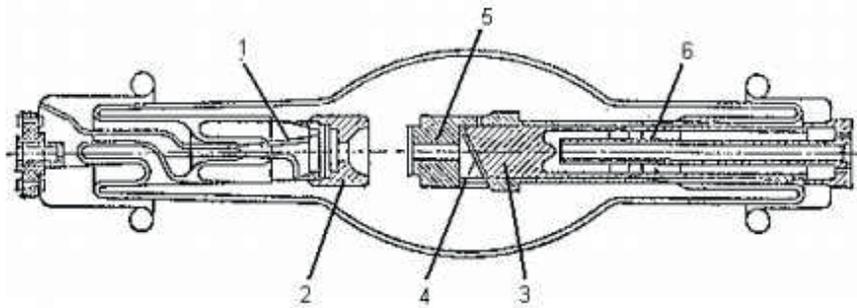


Рисунок 6.9 – Принципиальное устройство двухэлектродной рентгеновской трубки: 1 – катод; 2 – фокусирующее устройство; 3 – анод; 4 – вольфрамовая мишень; 5 – чехол анода; 6 – патрубок для ввода охлаждающей жидкости

по длине трубки. Магнитная фокусировка позволяет регулировать размер фокусного пятна. Современные рентгеновские трубки делают разборными; антикатоды съёмные.

На рисунке 6.9 представлено принципиальное устройство двухэлектродной рентгеновской трубки.

Рентгеновский аппарат состоит из электронной рентгеновской трубки, помещенной в защитный кожух, катодного и анодного генераторных устройств, штатива, масляного насоса, пульта управления.

Бак генераторного устройства, кожух с трубкой и бак насоса заполнены трансформаторным маслом, который служит изолятором. Масло, прокачиваемое через защитный кожух, охлаждает анод трубки (это могут быть и вода или

сжиженные газы). Защитный кожух выполняют из свинцового листа, объём заполняется маслом. Масло от насоса поступает сначала на полый анод трубки, а затем в защитный кожух. Для выхода излучения в кожухе имеется специальное окно, застеклённое материалом, слабо поглощающим излучение. В трубках, рассчитанных на мягкое излучение $\lambda_0 > 2\text{А}$, $U < 30\text{ кВ}$, окна застеклены бериллием, хорошо пропускающим такое излучение.

Линейные ускорители

В линейных ускорителях частицы однократно проходят электрическое поле с большой разницей потенциалов, т. е. ускоряются по прямому методу.

На рисунке 6.10 представлена схема линейного ускорителя с бегущей волной.

Электроны, генерируемые пушкой 5 импульсно с энергией 30–100 кэВ, ускоряются электрическим полем бегущей электромагнитной волны, создаваемой высокочастотным генератором 3 в цилиндрическом волноводе 4 (на каждые 30 см пути в волноводе электронам сообщается энергия примерно 1 МэВ). Электрическое поле бегущей волны направлено по оси цилиндра. Ускоренные электроны попадают на мишень 6, в которой возникает тормозное излучение большой интенсивности. Так, линейные ускорители с энергией 10–25 МэВ создают тормозное излучение, мощность экспозиционной дозы которого на расстоянии 1 м от мишени составляет 2000–25000 Р/мин, что позволяет использовать их для контроля сварных швов толщиной 400–500 мм.

Линейный ускоритель с секционированной ускоряющей трубкой состоит из большого числа промежуточных электродов. На каждый электрод подаётся увеличивающееся вдвое постоянное напряжение. Наибольшее напряжение достигает 1–2 МэВ и более при токе 0,2 мА. Диаметр фокусного пятна ~1 мм. Используется для контроля деталей толщиной 125–250 мм.

Линейный ускоритель со стоячей волной состоит из инжектора электронов, источника переменного напряжения и металлического резонатора, внутри

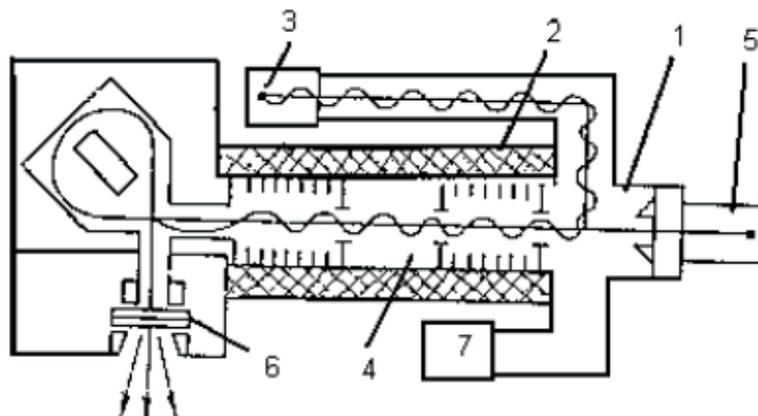


Рисунок 6.10 – Схема линейного ускорителя: 1 – камера; 2 – электромагнит; 3 – генератор; 4 – волновод; 5 – электронная пушка; 6 – мишень; 7 – вакуумный насос

которого расположены пролетные металлические трубки. Электроны из инжектора попадают в полость резонатора и проходят вдоль пролетных трубок. Под действием электрического поля в промежутках между трубками электроны ускоряются и в конце пути тормозятся на мишени, где и генерируется тормозное излучение.

6.2. Технология радиографического контроля

Радиографический контроль применяется для выявления в сварных соединениях трещин, непроваров, пор, включений шлаковых, вольфрамовых, оксидных и других, прожогов, подрезов, а также для оценки выпуклости и вогнутости корня шва, недоступного для внешнего осмотра.

С помощью радиографического контроля нельзя выявить:

- любые несплошности и включения, имеющие размеры (в направлении просвечивания) менее чувствительности контроля;
- непровары и трещины, плоскость раскрытия которых не совпадает с направлением просвечивания;
- любые несплошности и включения, если их изображения на снимках совпадают с изображениями посторонних деталей, острых углов или резких перепадов толщины просвечиваемого соединения.

Помимо рентгеновского излучения для контроля качества сварных швов используют γ - и β -излучения, причем каждый из видов излучения имеет свою область применения. В частности, рентгенографию, обладающую наибольшей чувствительностью, используют преимущественно в цеховых условиях и реже – в полевых (только когда к чувствительности контроля качества сварных соединений предъявляются наиболее высокие требования). Гаммаграфия доминирует при контроле качества сварных соединений, расположенных в труднодоступных местах, в полевых и монтажных условиях. Бета-тронную радиографию применяют преимущественно в цеховых условиях для выявления дефектов сварных соединений большой толщины.

При радиографическом контроле сварных соединений необходимо соблюдать определенную последовательность выполнения основных операций:

- выбрать источник излучения, рентгеновскую пленку, схему и режимы просвечивания;
- подготовить контролируемый объект к просвечиванию;
- просветить объект;
- выполнить фотообработку и расшифровать снимки;
- оформить результаты контроля.

Выбор источника излучения и рентгеновской пленки

Источник излучения выбирают исходя из технической целесообразности и экономической эффективности его использования с учетом следующих основных факторов: заданные чувствительность и производительность контроля, плотность и толщина материала контролируемого объекта, и его конфигурация.

Пленку выбирают в соответствии с требуемой производительностью и чувствительностью контроля и с учетом толщины и плотности материала просвечиваемого объекта.

Пленку РТ-1 применяют для контроля сварных соединений преимущественно большой толщины, так как она обладает высокой контрастностью и чувствительностью к излучению.

Универсальную экранную пленку РТ-2 используют при просвечивании сварных соединений разной толщины.

Для контроля соединений из алюминиевых сплавов и черных металлов небольшой толщины можно применять высококонтрастную пленку РТ-3 и РТ-4. При дефектоскопии ответственных соединений используют пленку РТ-5, которая обладает высокой контрастностью и позволяет выявлять мелкие дефекты. Однако она имеет наименьшую чувствительность к излучению, что приводит к увеличению продолжительности экспонирования при контроле.

Ориентировочный выбор рентгеновской пленки целесообразно производить по специальным номограммам.

Выбор схемы и режимов просвечивания

Радиографический контроль стыковых, нахлесточных, угловых и тавровых сварных соединений следует выполнять согласно схемам, представленным на рисунке 6.11.

Если привариваемая стенка имеет ширину, недостаточную для размещения пленки, то при контроле тавровых соединений можно направлять излучение по образующей стенки.

При контроле сварных соединений цилиндрических и сферических полых узлов (рисунок 6.11) следует отдавать предпочтение схемам просвечивания через одну стенку. При этом рекомендуется осуществлять просвечивание с помощью источника излучения, расположенного внутри контролируемого узла в соответствии со следующими схемами:

- рисунок 6.11, *а* (панорамное просвечивание) – для узлов диаметром до 2 м независимо от объема контроля и диаметром 2 м и более при 100 %-ном контроле;
- рисунок 6.11, *б* – при 100 % и выборочном контроле, если применение схемы, представленной на рисунке 6.10, *а*, невозможно;
- рисунок 6.11, *в* – при выборочном контроле узлов диаметром 2 м и более;
- рисунок 6.11, *г, д* – для узлов с внутренним диаметром 10 м и более, если использование схем, приведенных на рисунке 6.11, *а...в*, невозможно.

При контроле сварных соединений, выполняемом через две стенки, схемы, показанные на рисунке 6.11, *е...з*, рекомендуются для просвечивания цилиндрических и сферических полых узлов диаметром до 100 мм.

При контроле стыковых сварных соединений по схемам, показанным на рисунке 6.12, *а...д*, направление распространения излучения должно совпадать с плоскостью контролируемого соединения, а при контроле по этим схемам

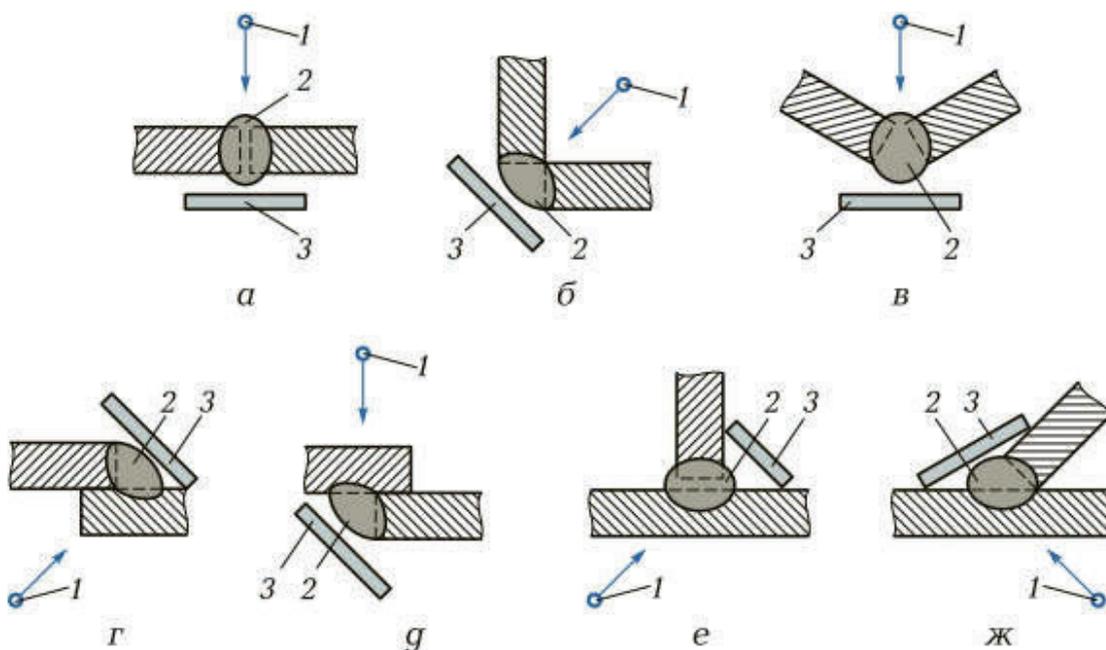


Рисунок 6.11 – Схемы радиографического контроля стыкового (а), угловых (б, в), нахлесточных (г, д) и тавровых (е, ж) сварных соединений: 1 – источник излучения; 2 – контролируемый участок; 3 – кассета с пленкой

угловых сварных швов труб, штуцеров и других деталей угол между направлением распространения излучения и плоскостью сварного соединения не должен превышать 45° .

При контроле сварных соединений по схемам, представленным на рисунке 6.12, *е...з*, направление распространения излучения следует выбирать таким образом, чтобы изображения противолежащих участков сварного шва на снимке не накладывались друг на друга. При этом угол между направлением распространения излучения и плоскостью сварного шва должен составлять $0...45^\circ$.

При выборе схемы просвечивания и направления распространения излучения необходимо учитывать следующее:

- расстояние от контролируемого сварного соединения до рентгеновской пленки должно быть минимально возможным, но не более 150 мм;
- угол между направлением распространения излучения и нормалью к рентгеновской пленке должен составлять $0...45^\circ$;
- непровары и трещины могут быть выявлены лишь в том случае, если угол между плоскостью их раскрытия и направлением просвечивания составляет $0...10^\circ$, а их ширина – не менее 0,05 мм. Длина снимков должна обеспечивать перекрытие изображений смежных участков сварных соединений не менее чем на 20 % от длины контролируемого участка, не превышающего 100 мм, и не менее чем на 20 мм при длине контролируемого участка более 100 мм.

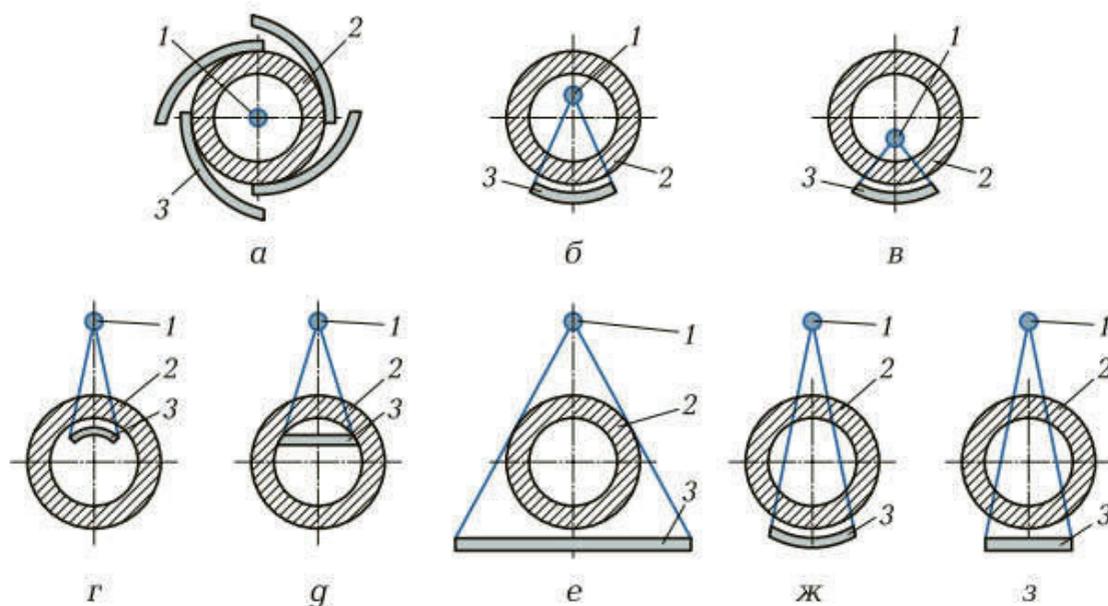


Рисунок 6.12 – Схемы (а...з) радиографического контроля сварных соединений цилиндрических и сферических полых узлов: 1 – источник излучения; 2 – контролируемый участок; 3 – кассета с пленкой

Для того чтобы снимки стыковых и нахлесточных соединений обеспечивали получение изображений сварного шва, эталонов чувствительности, маркировочных знаков и околошовных зон, их ширина должна составлять: не менее 5 мм при толщине свариваемого металла $S < 5$ мм; не менее S при $S = 5...20$ мм; не менее 20 мм при $S > 20$ мм. Для тавровых и угловых соединений ширина снимков указывается в технической документации на их контроль или приемку.

После выбора схемы просвечивания устанавливают фокусное расстояние. При его увеличении несколько повышается чувствительность метода, но возрастает (пропорционально квадрату расстояния) продолжительность просвечивания. Фокусное расстояние, выбираемое в соответствии со схемой просвечивания, толщиной материала и размерами активной части источника излучения (фокусного пятна), обычно составляет 300...750 мм.

Продолжительность экспонирования и длина контролируемого участка должны обеспечивать:

- оптическую плотность изображений контролируемого участка шва, околошовной зоны и эталонов чувствительности 1,5...3,0;
- оптическую плотность изображения любого участка сварного шва на пленке не менее 0,4...0,6 от оптической плотности изображения эталона чувствительности в зависимости от коэффициента контрастности пленки, но не менее 1,5;
- искажение размеров изображений дефектов на краях пленки по сравнению с центром, не превышающее 10 %, – для прямолинейных участков деталей и 25 % – для криволинейных.

Экспозиция рентгеновского излучения определяется как произведение силы тока рентгеновской трубки и времени облучения, а экспозиция γ -излучения – как произведение активности источника излучения, выраженной в γ -эквиваленте радия, и времени облучения.

Продолжительность просвечивания сварных соединений подбирают по номограммам, составленным для разных типов пленки, видов источников излучения и их фокусных расстояний, а уточняют с помощью пробных снимков.

6.3. Аппаратура для радиационного контроля

Для получения и использования рентгеновского излучения применяют рентгеновские аппараты.

Основными элементами конструкции рентгеновского аппарата являются: рентгеновская трубка в защитном кожухе, высоковольтный генератор и пульт управления. Высоковольтный генератор состоит из высоковольтного трансформатора, трансформатора накала трубки и выпрямителя. Пульт управления обычно содержит автотрансформатор, регулятор напряжения и силы тока, измерительные приборы, сигнальную систему и систему управления.

Марки аппаратов и их основные характеристики приведены в таблице 6.1.

В практике радиационной дефектоскопии широко распространены рентгеновские аппараты с постоянной нагрузкой, подразделяемые на аппараты-моноблоки и аппараты кабельного типа, а также импульсные

Аппарат-моноблок, у которого рентгеновская трубка и высоковольтный трансформатор смонтированы в единое устройство – блок-трансформатор, заполняют маслом или газом. Основное требование к таким аппаратам – минимальные габаритные размеры и масса.

Для достижения этого поступаются таким важным показателем процесса контроля, как длительность непрерывной работы. В аппаратах-моноблоках (рисунок 6.13) обычно применяется наиболее простая схема контроля – полуволновая безвентильная, в которой выпрямителем служит сама рентгеновская трубка.

На трубку подается ток непосредственно от трансформатора высокого напряжения. Трубка пропускает ток только в одном направлении в течение первого полупериода, а во втором полупериоде запирается, работая как выпрямитель. Применение подобной схемы сокращает срок службы трубки.

Выпускается типовой ряд аппаратов-моноблоков, снабженных унифицированными пультами управления. Это портативные аппараты, предназначенные для работы в полевых и монтажных условиях, и стационарные высоковольтные аппараты.

Аппараты-моноблоки преимущественно используются, когда требуется обеспечить работу излучателя на большом расстоянии (до 30 м и более) от пульта управления, а также его маневренность.

Таблица 6.1 – Характеристики рентгеновских аппаратов

Марка аппарата	Напряжение на трубке, кВ	Сила тока трубки, мА	Размеры фокусного пятна, мм	Масса аппарата кг	Толщина просвечиваемой стали, мм
Аппараты-моноблоки					
РУП-120-5	50...120	5	2×2	75	25
РУП-200-5	70...200	5	2×2	110	50
РУП-400-5	250...400	5	7*	600	120
РУП-160-10П	50...160	10	1,3×4,0	60	40
Аппараты кабельного типа					
РУП-100-10	10...100	10	1×1	200	30
РУП-150-10 (2 трубки)	35...100	10	5*	670	45
		2	0,3*		
РУП-150-300-10 (3 трубки)	35...300	10	4×4	1 000	70
		10	5*		
		2	0,3*		
РУП-150/300-01 (4 трубки)	35...300	2	0,3*	800	70
		10	4×4		
Импульсные аппараты					
РИНА-1Д	100	—	3*	12	10
РИНА-2Д	300	—	3*	15	20
РИНА-3Д	400	—	4*	46	40
МИРА-2Д	200	—	3*	15	20
МИРА-3Д	300	—	4*	25	40

*Диаметр фокусного пятна, мм.

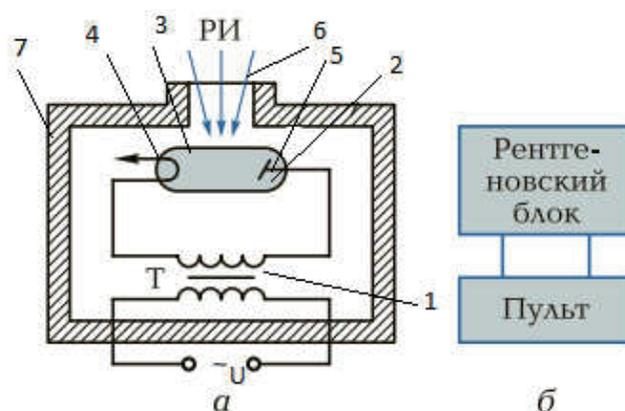


Рисунок 6.13 – Принципиальная (а) и структурная (б) схемы рентгеновского аппарата-моноблока: 1 – трансформатор; 2 – рентгеновская трубка; 3 – стеклянная колба; 4 – катод; 5 – анод с мишенью; 6 – рентгеновское излучение; 7 – кожух

Характерным примером здесь может служить аппарат РАП-160-6П (рисунок 6.14), предназначенный для контроля магистральных трубопроводов, который создает панорамное поле облучения, позволяя контролировать кольцевые стыки труб за одну операцию просвечивания при размещении его внутри трубы.

Аппараты кабельного типа включают в себя самостоятельное генераторное устройство, рентгеновскую трубку и пульт управления. В таких аппаратах, как правило, используется схема удвоения напряжения с двумя выпрямителями (рисунок 6.15).

В течение полупериода с отрицательным напряжением конденсаторы $C1$ и $C2$ заряжаются через выпрямители $VD1$ и $VD2$ до амплитудного значения, а с наступлением положительного полупериода они оказываются включенными последовательно с вторичной обмоткой трансформатора, и напряжение на аноде трубки повышается в два раза. Выход рентгеновского излучения происходит в течение положительного полупериода.

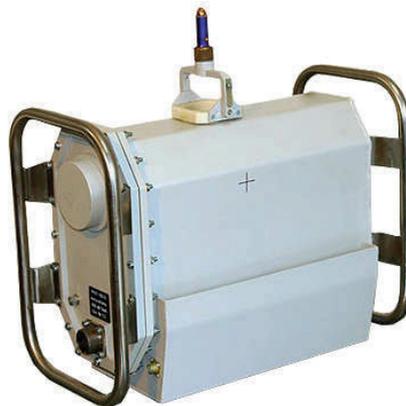


Рисунок 6.14 – Аппарат РАП-160-6П

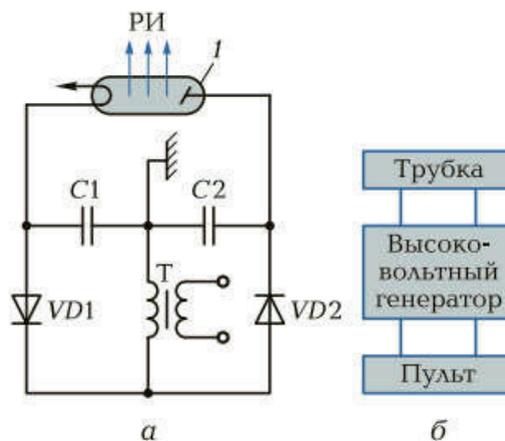


Рисунок 6.15 – Принципиальная (а) и структурная (б) схемы рентгеновского аппарата кабельного типа: 1 – рентгеновская трубка; РИ – рентгеновское излучение; $VD1$, $VD2$ – выпрямители; $C1$, $C2$ – конденсаторы; T – трансформатор

Аппараты кабельного типа, обычно выпускаются передвижными, используются в цеховых и лабораторных условиях. К аппаратам этого типа относится, например, рентгеновская установка РУП-100-10, рентгеновская трубка которой снабжена легким (массой 6 кг) защитным кожухом (рисунок 6.16).



Рисунок 6.16 – Аппарат
РУП-100-10

Малая масса блока излучения и возможность установки высоковольтного генератора и пульта управления на значительном расстоянии (до 10 м) от рентгеновской трубки позволяют применять данный аппарат для контроля труднодоступных участков сварных соединений.

Импульсные аппараты конструктивно состоят из двух блоков – рентгеновского и блока управления. Конденсатор блока управления заряжается через выпрямитель от трансформатора и с помощью электронного ключа разряжается на повышающий трансформатор в цепи трубки.

Под действием импульса высокого напряжения в рентгеновской трубке с холодным катодом возникает ток автоэлектронной эмиссии. Вследствие этого катод разогревается, и с его поверхности испускаются электроны, образуя облако плазмы, которое движется к аноду трубки с постоянной скоростью. В результате высокое напряжение (250...300 кВ) на вторичной обмотке высоковольтного трансформатора оказывается приложенным между передним фронтом движущейся плазмы и анодом рентгеновской трубки, что приводит к росту силы анодного тока, а следовательно, к генерации рентгеновского излучения.

Анодом двухэлектродной трубки служит массивный вольфрамовый стержень с наконечником в форме конуса (с углом при вершине 30°), а катодом – вольфрамовый цилиндр с заостренной торцевой кромкой. В начальный период работы рентгеновской трубки эмиссия электронов начинается не со всей торцевой поверхности катода, а только из точки с наибольшей напряженностью электрического поля, поэтому интенсивность излучения распределяется неравномерно.

С ростом числа включений трубки изменяется микроструктура катода, и сглаживаются особо острые зубцы на его поверхности. Вследствие этого увеличивается начальное напряжение автоэлектронной эмиссии, что приводит к возрастанию нестабильности интенсивности и спектрального состава рентгеновского излучения от включения к включению.

Импульсные трубки имеют большую мгновенную мощность, но длительность генерируемых ими импульсов очень мала (2...100 нс), а достигаемая частота их повторения не превышает 50 Гц.

Следует отметить, что небольшие габаритные размеры и малая масса импульсных аппаратов обусловили их широкое применение в промышленности, но

главным образом они используются при контроле магистральных трубопроводов, судостроительных конструкций и монтаже для проверки сварных соединений толщиной до 30 мм.

Основными недостатками импульсных рентгеновских аппаратов являются малый срок службы трубки и более низкая чувствительность, чем у ранее рассмотренных аппаратов. К их достоинствам относятся малая масса, портативность и возможность работы от низковольтных (12 В) источников питания.

Аппарат рентгеновский импульсный наносекундный автономный типа АРИНА. Назначение: служит для рентгеноскопии деталей, узлов и конструкций в труднодоступных местах. Удобен для работы в полевых условиях. Используется для контроля сварных соединений труб газо- и нефтепроводов, на трубосварочных базах, строительных площадках, стапелях и в цехах промышленных предприятий. Аппарат не требует предварительного прогрева и готов к работе немедленно после включения. Работает в любых климатических условиях. Широкая диаграмма направленности излучения обеспечивает возможность как направленного, так и панорамного просвечивания.

АРИНА включает в себя портативный импульсный генератор высокого напряжения и эмиссионную рентгеновскую трубку. Конструктивно аппарат выполнен в виде двух портативных блоков, которые легко транспортируются силами одного оператора. Блоки соединяются высоковольтным кабелем, длина которого (20 м) достаточна для обеспечения радиационной безопасности оператора в полевых условиях без применения средств защиты. Принцип действия аппарата основан на получении импульсов рентгеновского излучения под действием высоковольтных наносекундных импульсов. Аппарат имеет две модификации: АРИНА-01 (состоит из рентгеновского блока и пульта управления) и АРИНА-02 (состоит из рентгеновского блока и двух пультов управления).

Технические характеристики: толщина стали, доступная для рентгенографирования, составляет 25 мм с применением флюоресцентных экранов. Амплитуда напряжения на рентгеновской трубке 150 кВ. Экспозиционная доза рентгеновского излучения за 100 с на расстоянии 0,5 м от анода рентгеновской трубки 600 мр. Диаметр эффективного фокусного пятна 2...3 мм. Диапазон экспозиций 10...400 с.

Частота следования импульсов 8 Гц. Питание – от сети переменного тока: напряжение 220 В, частота 50 Гц (АРИНА-01 и АРИНА-02); от аккумуляторной батареи напряжением 24 В (АРИНА-02). Мощность, потребляемая от сети переменного тока, 200 Вт. Габариты: рентгеновского блока – 460×125×180 мм; пульта управления – 300×225×120 мм. Масса каждого блока соответственно по 6 кг. Вероятность безотказной работы в течение 1200 ч не менее 0,9. Условия эксплуатации: температура окружающей среды – 40...+50 °С, относительная влажность 100 %.

7. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

7.1. Вихретоковые МНК

В основе *магнитных методов неразрушающего контроля* лежит улавливание изменений магнитного поля исследуемого объекта в области возможного дефекта [43, 45, 46].

Магнитные поля, которые образуются около трещин или каких-либо других физических или магнитных неоднородностей материала, называют магнитными полями рассеяния. На рисунке 7.1 показаны силовые линии магнитного поля рассеяния, которое образуется над трещиной в постоянном магните. Воздух в полости трещины оказывает большое сопротивление магнитному потоку. Магнитный поток всегда стремится найти путь с наименьшим сопротивлением. Силовые линии магнитного поля деформируются вблизи трещины – рассеиваются, образуя как бы мост над трещиной. На гранях трещины образуются магнитные полюса N' и S' противоположной полярности. Магнитными полюсами называются участки ферромагнитного материала, на которых силовые линии магнитного поля пересекают границу «сталь–воздух».

Если деталь не имеет дефектов, то силовые магнитные линии будут распространяться в детали без изменения направления (рисунок 7.2, а). Напротив, если неоднородность среды нарушена дефектом (например, трещиной), то магнитные силовые линии деформируются в этих местах. Стремясь обойти эти места с пониженной магнитной проницаемостью, часть силовых линий выходит за пределы детали – рассеивается в воздухе.

Там, где силовые линии выходят из ферромагнитной детали в воздух и входят обратно из воздуха в деталь, возникают разноименные магнитные полюса N и S. Эти полюса создают над дефектом свое магнитное поле, которое называется магнитным полем рассеяния дефекта. Оно сохраняется в магнитотвердых материалах даже после снятия внешнего магнитного поля (рисунок 7.2, б). Таким образом, всякие магнитные неоднородности (несплошности металла или включения) вносят возмущения в распространение силовых линий магнитного поля [10].

Электрические МНК основаны на регистрации и анализе параметров электрического поля, которое взаимодействует с объектом контроля или возникает в нём в результате воздействия извне. Первичными информативными параметрами служат потенциал и ёмкость.

Рассмотрим суть электрических методов на примере электропотенциального метода, основанного на регистрации и анализе падения потенциала.

Если к телу из металла (рисунок 7.3) приложить электрическое напряжение, то в нём возникнет электрическое поле, причём точки с одинаковым потенциалом образуют эквипотенциальные линии. В местах дефектов возникнет падение



Рисунок 7.1 – Магнитное поле рассеяния над трещиной в постоянном магните: N' и S' – магнитные полюса на гранях и на поверхности детали вблизи трещины



Рисунок 7.2 – Магнитное поле в ферромагнитном материале при отсутствии (а) и наличии (б) трещины. N и S – магнитные полюса вблизи трещины



Рисунок 7.3 – Электропотенциальный МНК

напряжения, которое можно измерить с помощью электродов и сделать выводы о характере и масштабе повреждений.

Кроме электропотенциального метода, применяемого для контроля качества проводниковых материалов, используют следующие электрические методы:

- емкостной (контроль полупроводников и диэлектриков);
- термоэлектрический (контроль химического состава материала);
- электронной эмиссии;
- электроискровой;
- электростатического порошка (метод схож с магнитопорошковым).

Вихрековые МНК основаны на исследовании взаимодействия электромагнитного поля вихрекового преобразователя с наводимым в объекте контроля электромагнитным полем вихревых токов, имеющих частоту до 1 млн Гц [47, 48, 49, 52].

На практике данный метод используют для контроля объектов, которые изготовлены из электропроводящих материалов. С его помощью получают информацию о химическом составе и геометрическом размере изделия, о структуре материала, из которого объект изготовлен и обнаруживают дефекты, залегающие на поверхности и в подповерхностном слое (на глубине 2–3 мм). Типичный прибор, используемый этим методом, – вихретоковый дефектоскоп.

Принцип контроля заключается в следующем. С помощью катушки индуктивности 1 в объекте контроля 3 возбуждаются вихревые токи 2, регистрируемые приёмным измерителем, в роли которого выступает та же самая или другая катушка. По интенсивности распределения токов в контролируемом объекте можно судить о размерах изделия, свойствах материала, наличии несплошностей.

На рисунке 7.4 показан вихретоковый метод прохождения (возбуждающая катушка и приёмник расположены по двум сторонам объекта).

Электромагнитный (вихревых токов) метод основан на регистрации изменения взаимодействия собственного электромагнитного поля катушки с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых этой катушкой на контролируемом объекте. Применяется для обнаружения поверхностных дефектов в магнитных и немагнитных деталях и полуфабрикатах. Метод позволяет выявлять нарушение сплошности, в основном трещин, на деталях с различной конфигурацией, в том числе имеющих покрытия [52].

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.

Особенности, присущие вихретоковым методам: многопараметровость, бесконтактный контроль, нечувствительность к изменению влажности, давления и загрязнённости газовой среды и поверхности объекта 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.

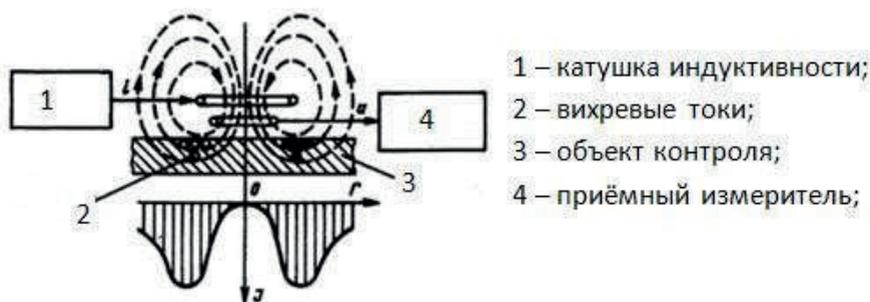


Рисунок 7.4 – Вихретоковый МНК

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), диаметра проволок, а также толщины лакокрасочных, эмалевых, керамических, гальванических и других покрытий, нанесенных на электропроводящую основу (толщинометрия);
- контроль химического состава, механических свойств, остаточных напряжений (старуктурскопия).

Вихретоковые дефектоскопы

Если рядом с объектом из ферромагнитного материала (скажем, из стали) создать переменное магнитное поле, внутри материала объекта индуцируются вихревые токи (токи Фуко). Вихревые токи, в свою очередь также создают магнитное поле, противодействующее внешнему магнитному воздействию (рисунок 7.5). Параметры вторичного магнитного поля фиксируются. Если внутри материала объекта имеются несовершенства (трещины, полости, прочие дефекты), это повлияет на конфигурацию вихревых токов, и, следовательно, на параметры создаваемого ими магнитного поля. Фиксируя эти изменения, можно получить информацию о внутренних дефектах объекта [51].

Достоинства:

- высокая скорость диагностики,
- высокая точность.

Недостатки:

- высокая стоимость,
- ограниченный диапазон материаловисследуемых тел.

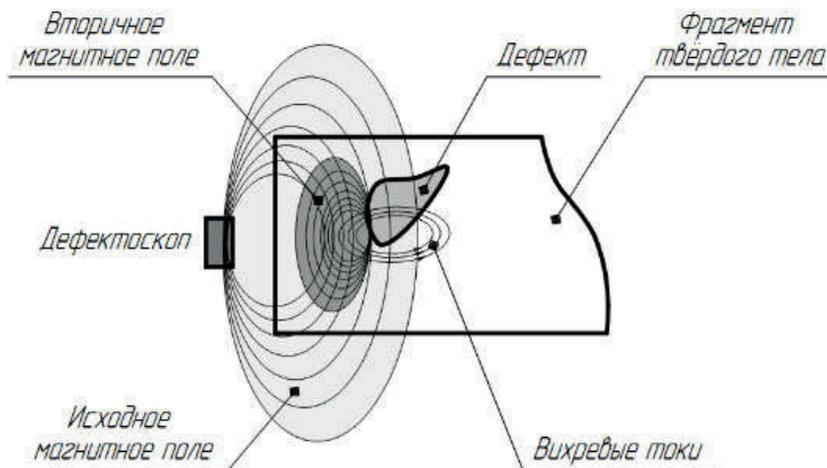


Рисунок 7.5 – Обнаружение скрытого дефекта с помощью вихретокового дефектоскопа

Применение

В авиации. Метод вихревых токов используется для контроля конструкций, изготовленных из токопроводящих материалов в воздушных судах:

Барабаны колес.

Лопасты воздушных винтов.

Лопатки компрессора и турбины газотурбинных двигателей.

Силовые элементы планера.

В железнодорожном транспорте вихретоковый контроль применяется для оценки состояния рельсового пути.

Вихретоковая (электроиндуктивная) диагностика основана на регистрации измерений электрических параметров датчика вихретокового дефектоскопа (полного сопротивления его катушки или эдс), вызванных взаимодействием поля вихревых токов, возбужденных этим датчиком в изделии из электропроводящего материала, с полем самого датчика. Результирующее поле содержит информацию об изменении электропроводности и магнитной проницаемости из-за наличия в металле структурных неоднородностей или нарушений сплошности, а также о форме и размерах (толщине) изделия или покрытия.

Датчики вихретоковых дефектоскопов выполняются в виде катушек индуктивности, помещаемых внутрь контролируемого изделия или окружающих его (проходной датчик), либо накладываемых на изделие (накладной датчик). В датчиках экранного типа (проходных и накладных) контролируемое изделие располагается между катушками. Вихретоковая диагностика не требует механического контакта датчика с изделием, что позволяет проводить контроль на высоких скоростях их относительного перемещения до (50 м/с). Вихретоковые дефектоскопы разделяются на следующие группы:

1. Приборы для обнаружения нарушений сплошности с проходными или накладными датчиками, работающими в широком частотном диапазоне – от 200 Гц до десятков МГц (повышение частоты увеличивает чувствительность к протяжённости трещин, поскольку можно применять малогабаритные датчики). Это позволяет выявлять трещины, неметаллические включения и др. Дефекты протяжённостью 1–2 мм при глубине их залегания 0,1–0,2 мм (накладным датчиком) или протяжённостью 1 мм при глубине 1–5 % от диаметра изделия (проходным датчиком).

2. Приборы для контроля размеров – толщинометры, с помощью которых измеряют толщину различных покрытий, нанесённых на основание из различных материалов. Определение толщины неэлектропроводящих покрытий на электропроводящих основаниях, представляющее собой по существу измерение зазора, производится на частотах до 10 МГц с погрешностью в пределах 1–15 % от измеряемой величины.

Для определения толщины электропроводящих гальванических или плакированных покрытий на электропроводящем основании используются вихретоковые

толщиномеры, в которых реализуются специальные схемы подавления влияния изменения удельной электропроводности материала основания и изменения величины зазора.

Вихретоковые толщиномеры применяются для измерения толщины стенки труб, баллонов из неферромагнитных материалов, а также листов и фольги. Диапазон измерений 0,03–10 мм, погрешность 0,6–2 %.

3. Вихретоковые структуромеры позволяют, анализируя значения удельной электропроводности и магнитной проницаемости, а также параметры высших гармоник напряжения, судить о химическом составе, структурном состоянии материала, величине внутренних напряжений, сортировать изделия по маркам материала, качеству термической обработки и т. д. Для этого в зависимости от конкретного назначения прибора используется либо НЧ-поля большой напряжённости, либо ВЧ-поля малой напряжённости, либо двух- и многочастотные поля и осуществляется спектральный анализ сигнала. Приборы для контроля ферромагнитных материалов работают в НЧ-диапазоне (50 Гц–10 кГц), для контроля неферромагнитных – в ВЧ-диапазоне (10 кГц–10 МГц), что обусловлено зависимостью скин-эффекта от значения магнитной проницаемости.

Вихретоковый метод основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте.

В настоящее время метод вихревых токов широко используется как для обнаружения дефектов, так и для измерений электропроводности материалов, а также измерения толщины, как правило, покрытий.

Одним из самых существенных преимуществ ручного вихретокового метода контроля по отношению к магнитопорошковому и капиллярному методу контроля являются:

- 1) вихретоковый контроль является намного более производительным. Скорость проведения ручного контроля, например, сварного соединения, может составлять до 100 мм/с;
- 2) возможность проведения контроля по поверхности с шероховатостью Rz 320;
- 3) возможность проведения контроля через слой немагнитного покрытия толщиной до 2 мм;
- 4) контроль мест с ограниченным доступом к поверхности, а также деталей сложной конфигурации.

Радиоволновые МНК основаны на измерении параметров электромагнитных волн, взаимодействующих с объектом. Применение данного метода МНК возможно только с объектами, не заглушающими радиоволны (диэлектриков, полупроводников и т. д.).

Пример взаиморасположения генератора, объекта контроля и приёмника волн приведён на рисунке 7.6.

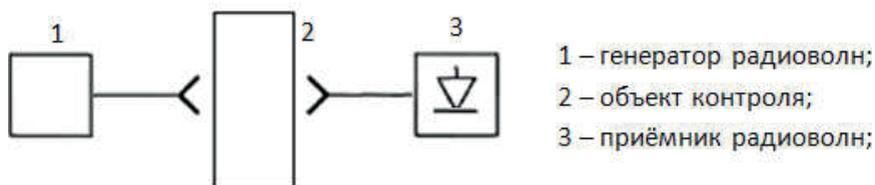


Рисунок 7.6 – Пример взаиморасположения генератора, объекта контроля и приемника волн при радиоволновом МНК

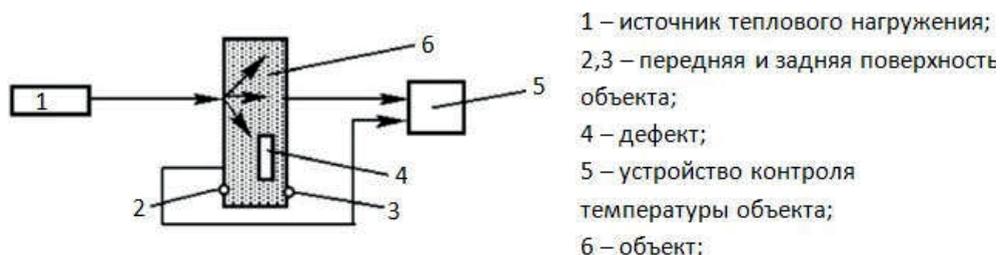


Рисунок 7.7 – Активный метод теплового МНК

Тепловые МНК в качестве пробной (несущей информацию) энергии используют распространяющуюся в объекте контроля тепловую энергию. Температурное поле напрямую зависит от происходящих в объекте процессах теплопередачи, особенности которых зависят от наличия дефектов (как внутренних, так и наружных).

Основной информативный параметр тепловых МНК – разность температур между бездефектными и дефектными областями объекта. Температура может измеряться контактным и бесконтактным методом.

В зависимости от характера взаимодействия контролируемого объекта и тепловой энергии различают активный (рисунок 7.7) и пассивный методы тепловых МНК.

Активный метод заключается в следующем: контролируемый объект 6 с помощью внешнего источника 1 охлаждают или нагревают, а затем с помощью устройства контроля 5 измеряют тепловой поток и температуру на его поверхности. Участкам повышенного или пониженного нагрева соответствуют дефекты 4.

В случае пассивного метода тепловой источник отсутствует, а анализируют тепловые потоки работающих объектов. Таким образом, место с повышенной температурой соответствует дефекту или неисправности.

7.2. Сущность магнитных методов неразрушающего контроля

В данном разделе рассматривается сущность магнитных методов неразрушающего контроля, рассматриваются различные виды данного метода, их плюсы и минусы, приводится их классификация [43].

Магнитный неразрушающий контроль – вид неразрушающего контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом.

Методы неразрушающего контроля принято классифицировать по двум признакам:

- 1) первичному информативному параметру;
- 2) по способу получения первичной информации.

Все методы магнитной дефектоскопии заключаются в намагничивании ферромагнитных объектов контроля и в дальнейшей регистрации полей рассеяния дефектов.

Все эти методы контроля объединяют два общих признака – объект контроля обладает ярко выраженными характеристиками ферромагнетика и обязательной процедурой контроля является намагничивание (как правило, в средних или сильных магнитных полях).

Классификация ММНК по данным признакам представлена в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Классификация ММНК

По первичному информативному параметру	По способу получения первичной информации
1. Коэрцитивной силы	1. Магнитопорошковый
2. Намагниченности	2. Индукционный
3. Остаточной индукции	3. Феррозондовый
4. Магнитной проницаемости	4. Эффекта Холла
5. Напряженности	5. Магнитографический
6. Эффекта Баркгаузена	6. Пондеромоторный
	7. Магниторезисторный

Метод коэрцитивной силы – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации коэрцитивной силы объекта. Коэрцитивная сила (от лат. *coercitio* «удерживание») – это значение напряжённости магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферро- или ферромагнитного вещества. Единица измерения в системе СИ – Ампер/метр. Чем большей коэрцитивной силой обладает магнит, тем он устойчивее к размагничивающим факторам.

Метод намагниченности – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации намагниченности контролируемого объекта. Намагниченность – векторная физическая величина, характеризующая магнитное состояние макроскопического физического тела. Обозначается обычно *M*. Определяется как магнитный момент единицы объёма вещества.

Метод остаточной индукции – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации остаточной индукции материала контролируемого объекта после взаимодействия с магнитным полем. Остаточная индукция – это та степень намагниченности, которая остается в магнитном материале, когда внешнее магнитное поле исчезает.

Метод магнитной проницаемости – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитной проницаемости контролируемого объекта. Магнитная проницаемость – физическая величина, коэффициент (зависящий от свойств среды), характеризующий связь между магнитной индукцией и напряжённостью магнитного поля в веществе. Для разных сред этот коэффициент различен, поэтому говорят о магнитной проницаемости конкретной среды (подразумевая её состав, состояние, температуру и т. д.).

Метод напряжённости – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации напряжённости магнитного поля, взаимодействующего с контролируемым объектом. Напряжённость магнитного поля (стандартное обозначение H) – векторная физическая величина, равная разности вектора магнитной индукции B и вектора намагниченности M .

Метод эффекта Баркгаузена – метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации параметров магнитного шума, возникающего в результате эффекта Баркгаузена. Эффект Баркгаузена – скачкообразное изменение намагниченности (J) ферромагнитного вещества при монотонном, непрерывном изменении внешних условий, приводящих к изменению доменной структуры материала.

7.3. Магнитопорошковый метод

Самым распространённым и надёжным среди МНК своего вида является *магнитопорошковый* – основанный на возникновении неоднородности магнитного поля над местом дефекта.

Для реализации метода необходимо подготовить поверхность контролируемого объекта, намагнитить её и обработать магнитной суспензией. Металлические частицы, попавшие в неоднородное магнитное поле, возникшее над повреждением, притягиваются друг к другу и образуют цепочные структуры (рисунок 7.8), выявляемые при осмотре деталей.

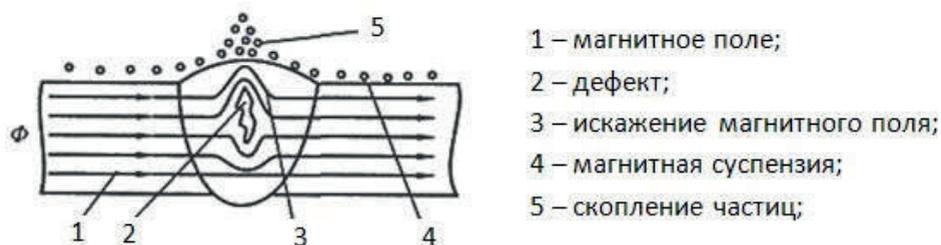


Рисунок 7.8 – Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля

7.4. Индукционный метод

Индукционная дефектоскопия (метод вихревых токов) может быть применена для контроля точечных и роликовых сварных соединений как из ферромагнитных, так и немагнитных металлов, и сплавов и заключается в измерении взаимодействия электромагнитного поля с металлом. Основными элементами установки для этого метода контроля являются: катушка (рисунок 7.9), по которой течет переменный ток и приборы для его измерения [46].

Накладные испытательные катушки с током располагают на поверхности изделия в месте точки. Для возбуждения катушек применяют переменный ток от низкой звуковой частоты до радиочастоты. При испытаниях электромагнитная энергия проникает в исследуемое изделие подобно рентгеновским лучам, теплу, ультразвуку. Часть энергии, возбуждаемой катушкой, поглощается в детали и превращается в тепло. Если детали ферромагнитные, то происходит также потеря энергии из-за магнитного гистерезиса. Часть энергии отражается и возвращается обратно в катушку, причем предполагается, что величина отражаемой энергии будет неодинаковой при ядре номинальных размеров и полномнепроваре.

Характер отраженного поля зависит от качества сварной точки (шва) и от металла. В деталях из ферромагнитного металла индуктируются вихревые токи, и изменяется доменная структура металла, а в неферромагнитном металле последнее явление отсутствует. Вихревые токи обладают многими свойствами сжимаемых жидкостей. При встрече с препятствием, например, со слоем окислов при непроваре, трещиной, вихревые токи обходят их и в то же время сжимаются и ослабевают. Собственное поле вихревых токов, возникающее в пространстве между отдельными дефектами, отражает электромагнитную энергию обратно в систему катушки, где она может быть измерена. Однако кроме дефектов, величина отраженного сигнала зависит от изменения электросопротивления, структуры и толщины металла, геометрии места сварки и т. д. Так как все перечисленные факторы не остаются неизменными для каждой контролируемой сварной точки или участков роликового шва, отделить полезный сигнал при частичном или полном непроваре от влияния других факторов пока не удалось.

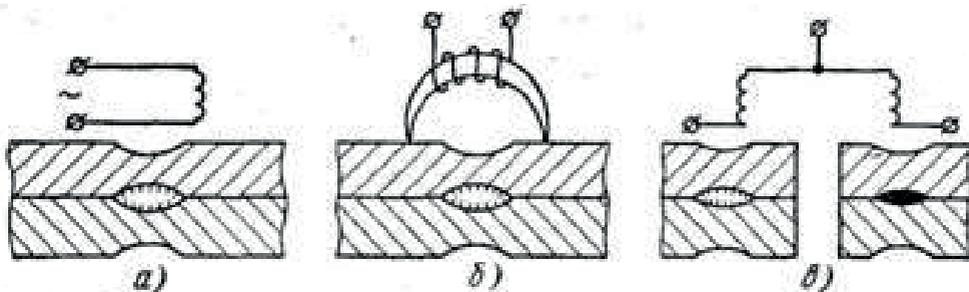


Рисунок 7.9 – Типы испытательных катушек: а – накладная; б – накладная с дугообразным сердечником; в – сравнительные накладные катушки

7.5. Феррозондовый метод

Принцип действия феррозондовых преобразователей (ФП) основан на том, что при одновременном действии на ферромагнитный сердечник постоянного и переменного магнитных полей, направленных по оси сердечника, его намагничивание будет происходить по несимметричной части гистерезиса. При этом в индукции магнитного поля сердечника изменится соотношение между нечетными гармониками, и появятся четные гармоники. Принцип работы и условное обозначение ФП – полемера показаны на рисунке 7.10. На двух сердечниках К1 и К2, изготовленных из материала с высокой магнитной проницаемостью, имеется по одной возбуждающей и одной измерительной обмотке.

Возбуждающие обмотки включены последовательно-встречно и подключены к внешнему генератору синусоидального напряжения. При этом в сердечниках К1 и К2 наводится переменное магнитное поле. При нарастании мгновенной напряженности поля в течение одного периода в сердечнике К1 появляется положительное намагничивание и соответственно положительная магнитная индукция. Поскольку первичные обмотки включены навстречу друг другу, в сердечнике К2 в это же время возникает отрицательное намагничивание и, следовательно, отрицательная индукция.

На ФП оказывает действие только та составляющая постоянного поля, которая совпадает по направлению с сердечниками катушек, следовательно, можно определить измеряемое поле по величине и направлению, вращая ФП до тех пор, пока на показывающем приборе не появится наибольшее показание, т. е. пока зонд не покажет направление поля. Если значение постоянного измеряемого поля такого же порядка, что и земное магнитное поле, то земное поле необходимо

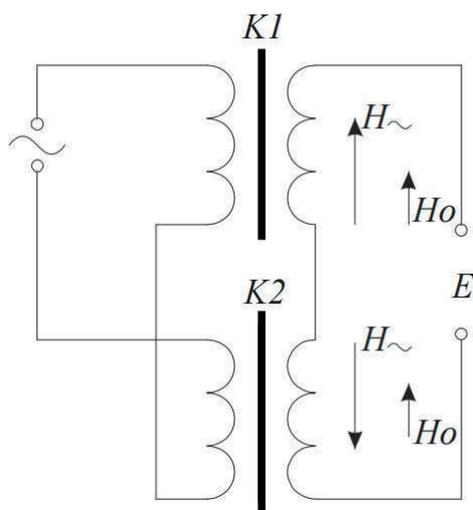


Рисунок 7.10 – Конструкция феррозондового преобразователя (ФП): К1 и К2 – сердечники из магнитомягкого материала; H_{\sim} – внутреннее переменное магнитное поле сердечников; H_0 – внешнее магнитное поле

каким-либо способом подавить (компенсировать). С подобной проблемой часто сталкиваются при измерении магнитного поля рассеяния дефекта, т. к. у дефектов малых размеров поле рассеяния невелико. Поэтому в магнитной дефектоскопии, как правило, используют феррозонды-градиентометры, которые измеряют разность напряженности магнитного поля в двух соседних точках. Конструктивно ФП-градиентометры отличаются от ФП-полимера лишь способом соединения обмоток (возбуждающие обмотки включены последовательно-согласно, а измерительные – последовательно-встречно). Частота возбуждающего тока, которым питают возбуждающие обмотки, зависит от величины и скорости изменения измеряемого поля и может находиться в диапазоне от 50 Гц до сотен килогерц. ФП, предназначенные для измерения напряженности поля, работают на частотах возбуждающего тока 1...10 кГц, а феррозонды дефектоскопов – на частотах 10...300 кГц. ФП обладают высокой чувствительностью к магнитному полю – они позволяют получить порог чувствительности измерительных устройств-магнитометров 10–6 А/см. ФП можно использовать и для измерения переменного магнитного поля – для этого нужно обеспечить частоту возбуждающего поля минимум на порядок выше частоты измеряемого поля.

7.6. Магнитографический метод

Магнитографическая дефектоскопия основана на воздействии поля дефекта на магнитную ленту.

Способ магнитографической дефектоскопии основан на намагничивании зоны сварного шва вместе с прижатой к его поверхности эластичной магнитной лентой, фиксации возникающих на ней в местах дефектов полей рассеивания и последующем воспроизведении полученной записи. Считывание магнитных отпечатков полей дефектов осуществляется в специальных дефектоскопах, где запись при помощи воспроизводящих магнитных головок преобразуется в электрические сигналы, а магнитная лента может быть использована как объективный документ, сохраняющий данные о качестве проконтролированного изделия ответственного назначения. При магнитографической дефектоскопии плоских изделий большой эффект достигается применением стационарных длиннопольных намагничивающих устройств (ДНУ), токовые обмотки которых включаются синхронно с движением магнитной ленты вдоль исследуемого сварного шва (рисунок 7.11).

Достоинством магнитографического метода является высокая чувствительность к дефектам, расположенным на глубине до 15–20 мм, возможность импульсной и видеоиндексации дефектов на экране электронно-лучевой трубки. Основными недостатками магнитографического метода являются недостаточная чувствительность к выявлению округлых дефектов (шлаковые включения и газовые поры), расположенные в корне шва, а также низкое качество визуализации магнитной записи на люминесцентном экране электронно-лучевой трубки. Этот

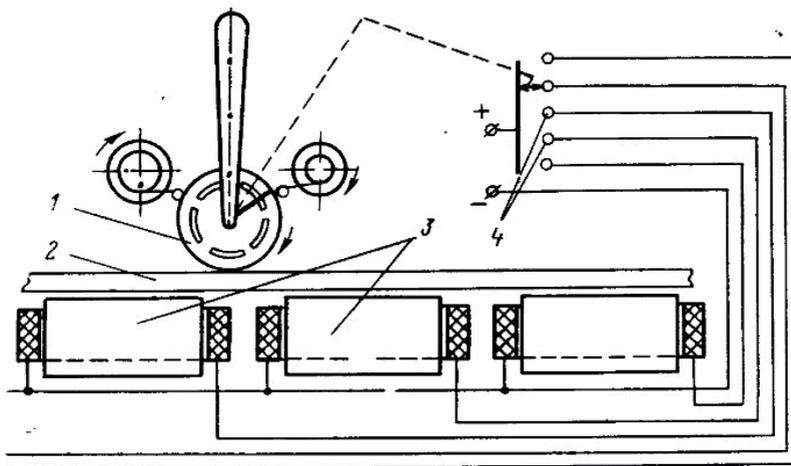


Рисунок 7.11 – Кинематическая схема длиннополюсного намагничивающего устройства (ДНУ): 1 – каток лентопротяжного устройства; 2 – изделие; 3 – полюса НУ; 4 – группа контактов

недостаток обуславливается тем, что из-за малого послесвечения люминесцентного экрана за время заполнения строками полного кадра на экране дефектоскопа, начало формируемого изображения успевает потускнеть.

7.7. Метод эффекта Холла

Пондеромоторный и магниторезистивный метод

Метод, основанный на эффекте Холла, используют для обнаружения дефектов в приборах для измерения толщины, контроля структуры и механических свойств. Эффект Холла заключается в том, что если прямоугольную пластинку из полупроводникового материала поместить в магнитное поле перпендикулярно вектору напряженности, и пропускать по ней ток в направлении двух противоположных граней, то на двух других гранях возникнет ЭДС, пропорциональная напряженности магнитного поля.

Пондеромоторный метод основан на взаимодействии измеряемого магнитного поля и магнитного поля тока в рамке прибора или магнита. Этот метод применяется при дефектоскопии дорожных рельс.

Магниторезисторный метод основан на выявлении магнитных полей магниторезистивными преобразователями, представляющими собой гальваномагнитный элемент, принцип работы которого основан на магниторезистивном эффекте Гаусса.

7.8. Применение магнитных методов неразрушающего контроля в обнаружении дефектов в современной промышленности

В данном разделе приводится пример использования промышленного феррозондового дефектоскопа и возможные пределы чувствительности современных устройств при определении дефектов в ферромагнитных изделиях на сегодняшний день.

Дефектоскоп-градиентометр ДФ-201.1 является первым микропроцессорным феррозондовым прибором. Он реализует функциональную схему дефектоскопа-градиентометра и предназначен для обнаружения дефектов в намагниченных ферромагнитных деталях, в том числе в сварных деталях, и измерения градиента напряженности магнитного поля. Прибор состоит из электронного блока и феррозондового преобразователя (ФП) (рисунок 7.12).



Рисунок 7.12 – Внешний вид дефектоскопа-градиентометра ДФ-201.1

Феррозондовый преобразователь содержит две измерительные катушки, оси сердечников которых параллельны друг другу и перпендикулярны доньшку ФП. Расстояние x между осями (база ФП) выбирается так, чтобы получить максимальное значение выходного сигнала, пропорционального разности $H_z = H_{z2} - H_{z1}$ (рисунок 7.13), где x – ось, совпадающая с линией перемещения ФП, но по поверхности детали; z – нормаль к поверхности детали и доньшку ФП; H_z – проекция напряженности магнитного поля на ось z .

Измеряемый прибором градиент определяется соотношением:

$$G = \frac{H_{z2} - H_{z1}}{\Delta x} \quad (7.1)$$

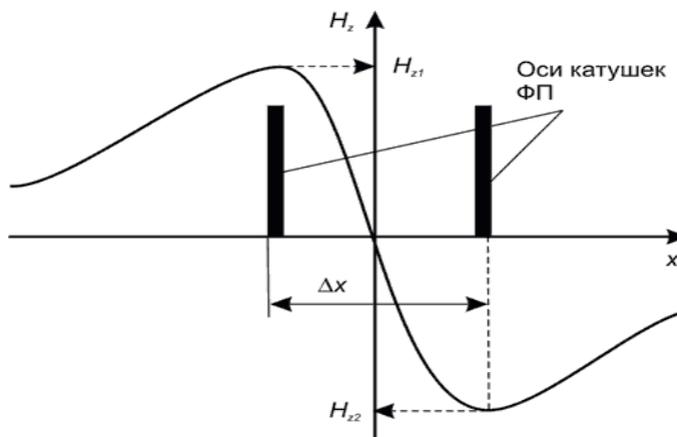


Рисунок 7.13 – Распределение H_z над дефектом

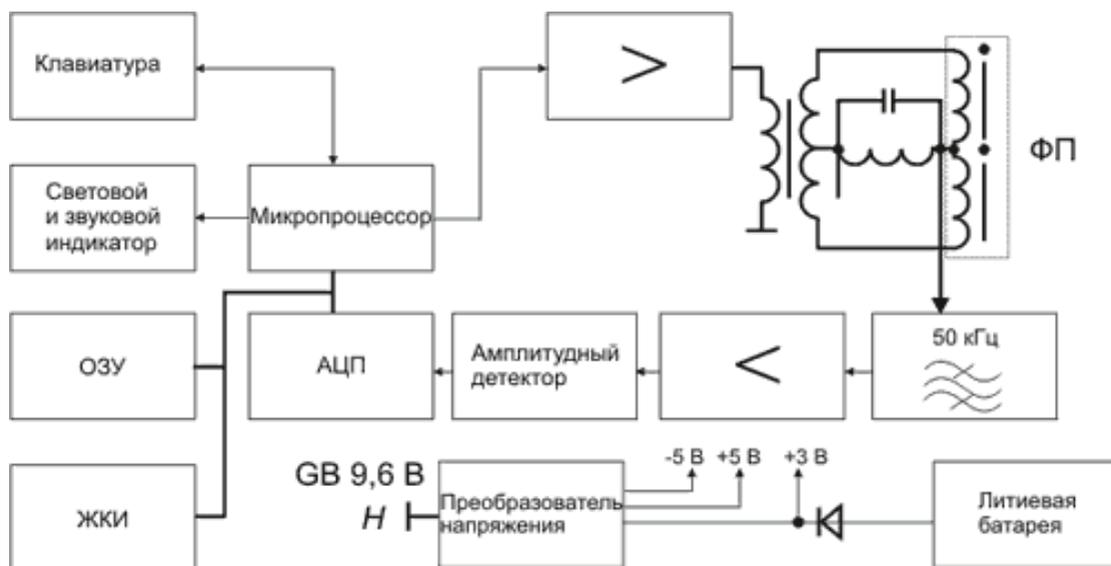


Рисунок 7.14 – Структурная схема ДФ-201.1

В микропроцессоре формируется ток возбуждения ФП и обрабатывается информация, поступающая с клавиатуры и АЦП. С помощью ФП, полосового фильтра на 50 кГц и амплитудного детектора градиент G преобразуется в напряжение, которое поступает на вход ЛЦП. Текущее значение градиента индицируется на жидкокристаллическом дисплее.

В таблице 7.2 приведены технические характеристики дефектоскопа-градиентометра.

Если значение градиента превышает значение порога, которое также индицируется на дисплее, начинают работать звуковой и световой индикаторы. В ОЗУ накапливается технологическая информация о 400 проверенных деталях, а также значения градиента над выявленными дефектами.

Таблица 7.2 – Технические характеристики ДФ-201.1

Наименование параметра	Значение
Диапазон показаний градиента, А/м ²	±(0–250 000)
Диапазон измерений градиента, А/м ²	±(1 000–200 000)
Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения градиента, % (G_k – верхний предел измерения градиента, G – измеренное значение градиента)	$\pm \left[10 + 0.01 \left(\left \frac{G_k}{G} \right - 1 \right) \right]$
Продолжительность непрерывной работы прибора без подзарядки аккумуляторной батареи, ч, не менее	24
Габаритные размеры прибора (в чехле), мм, не более	155×135×70
Масса прибора (в чехле), кг, не более	1,4
Диапазон рабочих температур окружающего воздуха, °С	От +5 до +40
Влажность при температуре плюс 30 °С	До 95

Накопленная информация периодически сбрасывается на компьютер и используется для формирования базы данных результатов контроля за длительное время. Для питания ОЗУ во время замены аккумуляторной батареи используется литиевая батарея.

Основное применение прибора – контроль боковых рам, надрессорных блоков тележек (база ФП равна 4 мм) и автосцепных устройств (база уменьшена до 3 мм для уменьшения размеров ФП) грузовых вагонов. Для намагничивания указанных деталей используются специализированные электромагниты или постоянные редкоземельные магниты.

Минимальные размеры выявляемых дефектов:

поверхностных: ширина 0,002 мм, глубина 0,1 мм, длина 2 мм;

подповерхностных: ширина 0,3 мм, глубина 0,5 мм, длина 2 мм при максимальной глубине залегания дефекта 5,0 мм.

В дефектоскоп с помощью цифровой клавиатуры может вводиться и храниться в памяти:

- заводской номер проверяемого изделия;
- заводской номер проверяемой детали;
- код проверяемой детали;
- параметр проверяемой детали;
- год изготовления проверяемой детали;
- код предприятия-изготовителя;
- личный номер дефектоскописта;
- тип дефекта;
- зона дефекта;
- размер дефекта;
- заключение по дефекту.

В приборе автоматически фиксируются дата и время контроля.

Дефектоскоп-градиентометр ДФ-201.1 как средство измерения зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений (№ 15914–99, сертификат RU.C.27.058.A № 7031) и периодически поверяется аккредитованными метрологическими службами.

Основным и наиболее существенным отличием системы от приведенного выше устройства является уникальный датчик (описание и электрическая принципиальная схема данного датчика представлены на рисунке 7.15).

7.9. Разработка информационной системы

Процесс разработки информационной системы обнаружения дефектов включает следующие этапы:

1. Разработку структурно-функциональной схемы всей информационной системы с описанием блоков схемы.
2. Разработку основных элементов системы.

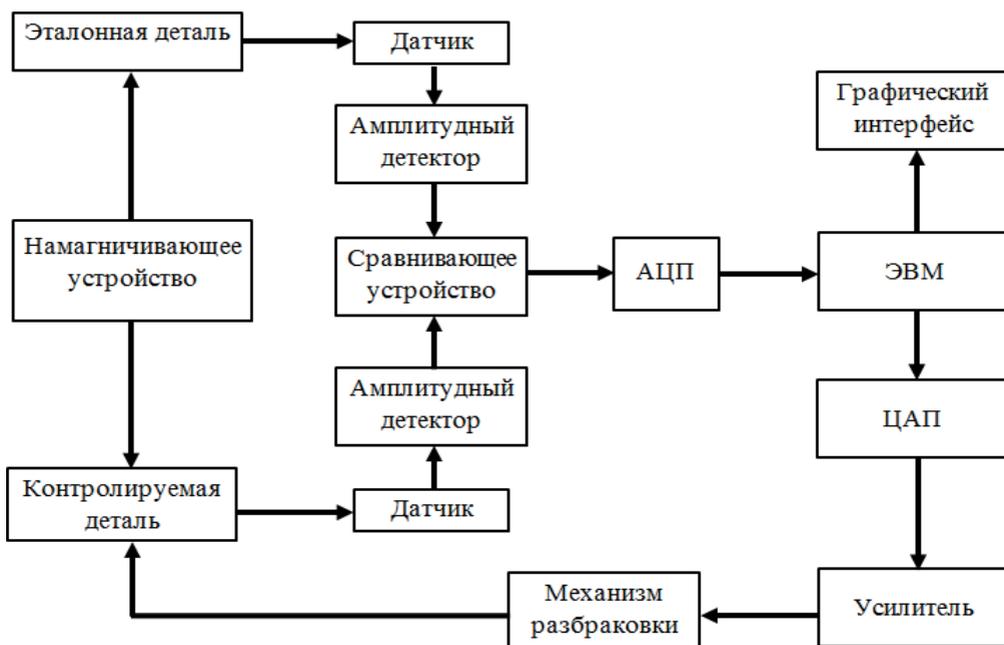


Рисунок 7.15 – Информационная система для обнаружения поверхностных дефектов ферромагнитных изделий. Схема структурно-функциональная

3. Разработку электрической принципиальной схемы датчика системы на основе LC-автогенератора.
4. Разработку электрической принципиальной схемы амплитудного детектора.
5. Разработку электрической принципиальной схемы сравнивающего устройства.
6. Составление математической модели инерционной части системы.

Разработка структурно-функциональной схемы

Структурно-функциональная схема представлена на рисунке 7.15. В основе действия информационной системы лежит классический принцип сравнения характеристик эталонной (бездефектной) и контролируемой детали. Предварительно намагниченные до одинакового уровня изделия исследуют магнитоэлектрическими преобразователями с одинаковой магнитной чувствительностью с последующим преобразованием сигналов на амплитудных детекторах и сравнением значений зарегистрированных амплитуд на сравнивающем устройстве и последующей обработкой через аналого-цифровой преобразователь АЦП на ЭВМ. В качестве обратной связи в данной системе выступает блок цифро-аналогового преобразователя ЦАП, усилителя и механизма разбраковки, который по команде от ЭВМ осуществляет отбраковку дефектных деталей. Управление системой может осуществляться через графический интерфейс ЭВМ.

Намагничивающее устройство создает намагничивающее поле для магнитного насыщения эталонной и контролируемой детали. Безуглеродистые сплавы

железа, а также аустенитные стали обычно парамагнитны и содержат лишь небольшое количество феррита, поэтому для их магнитного насыщения требуются большие намагничивающие поля (до 1 000 000 А/м). Для обычных конструкционных мало- и среднелегированных сталей, у которых преобладает ферромагнитная фаза (феррит, мартенсит – *martensite*), а количество аустенита не превышает 10...15 %, магнитное насыщение достигается уже в полях $H = 100\,000$ А/м. В качестве намагничивающего устройства можно использовать как постоянные, так и электромагниты.

Эталонная деталь является конструктивно и технологично идентичной контролируемой и не имеет дефектов. Данную эталонную деталь следует предварительно выбрать, проверив ее на все типы дефектов, применяя радиационные или акустические методы контроля.

Контролируемая деталь входит в поле действия датчика информационного устройства сконвейера. Датчиками являются феррозондовые магнитоэлектрические преобразователи, построенные на схеме автогенератора с трансформаторной обратной связью (рисунки 7.14).

Амплитудные детекторы построены по схеме прецизионного выпрямителя с интегратором на операционных усилителях.

В качестве компаратора используется схема вычитающего усилителя с дифференциальным входом.

Механизм разбраковки состоит из соленоида, который открывает заслонку в держателе детали при команде с ЭВМ на отбраковку, тем самым удаляя деталь с конвейера.

Следует отметить, что наличие эталонной детали в данной системе, как и измерительной системы для определения ее характеристик, не обязательно. Возможно определение и запись характеристик бездефектных изделий в память вычислительной машины и в результате сравнения сигнала с контролируемой деталью на программном уровне, что позволяет упростить и удешевить систему.

Разработка принципиальной схемы ИС

В качестве чувствительного элемента в данной разработке применен магнитоэлектрический преобразователь на LC-автогенераторе с трансформаторной обратной связью, выполненный по схеме Майснера. Автогенераторы служат для создания незатухающих колебаний высокой частоты. Данная схема имеет высокую выходную мощность при низком питающем токе, что увеличивает энергосбережение и чувствительность датчика. Принципиальная электрическая схема данного генератора представлена на рисунке 7.16.

В качестве колебательного контура в данной схеме выступает связь $L_2 C_2$. В результате обмена энергией между конденсатором и катушкой в контуре возникают свободные затухающие колебания, частота которых определяется параметрами контура:

$$f_0 = 1 / 2\pi\sqrt{L_2 C_2} . \quad (7.2)$$

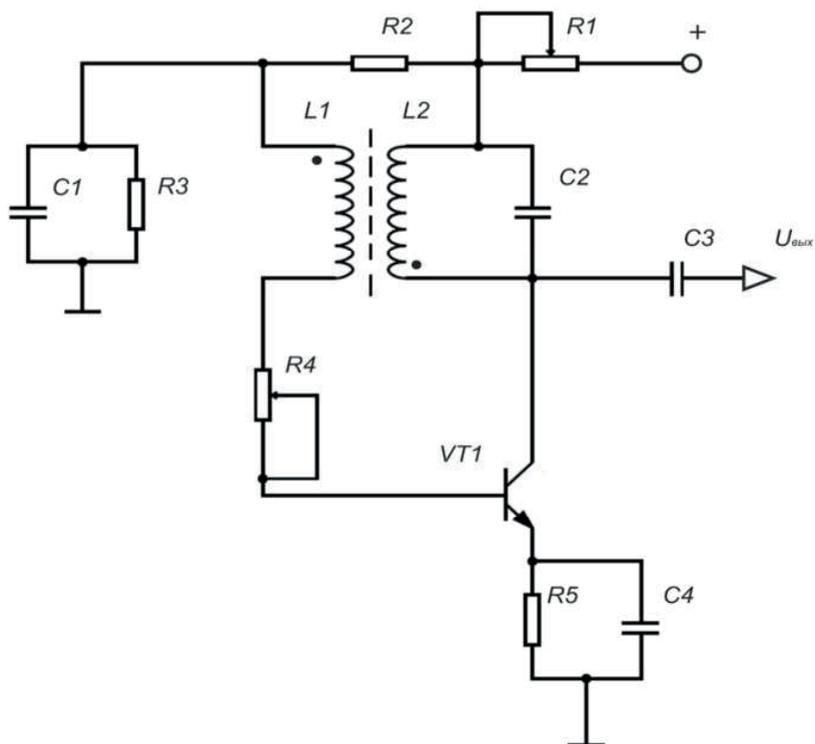


Рисунок 7.16 – Схема LC -автогенератора по схеме Майснера. Схема электрическая – принципиальная

Переменный (колебательный) ток контура, проходя через катушку $L1$, создает вокруг нее переменное магнитное поле. Вследствие этого в катушке обратной связи $L2$, включенной в цепь базы транзистора, наводится переменное напряжение той же частоты, с которой происходят колебания в контуре. Это напряжение вызывает пульсацию тока коллектора, в котором появляется переменная составляющая.

Переменная составляющая коллекторного тока восполняет потери энергии в контуре, создавая на нем усиленное транзистором переменное напряжение. Это приводит к новому нарастанию напряжения на катушке связи $L2$, которое влечет за собой новое нарастание амплитуды тока коллектора и т. д.

Наращение коллекторного тока наблюдается лишь в пределах активного участка выходной характеристики транзистора (на участке насыщения, как известно, ток коллектора практически не меняется). Что же касается амплитуды колебаний в контуре, то ее рост ограничивается сопротивлением потерь контура, а также затуханием, вносимым в контур за счет протекания тока в базовой обмотке.

Незатухающие колебания в контуре автогенератора установятся лишь при выполнении двух основных условий, которые получили название условий самовозбуждения.

Первое из этих условий называют условием баланса фаз. Сущность его сводится к тому, что в схеме должна быть установлена именно положительная

обратная связь между выходной и входной цепью транзистора. Только в этом случае создаются необходимые предпосылки для восполнения потерь энергии в контуре.

На практике выполнение условия баланса фаз достигается соответствующим включением концов катушек $L1$ и $L2$. При отсутствии самовозбуждения необходимо поменять местами концы катушки связи $L2$. При этом автогенератор должен самовозбуждаться, если в схеме нет других неисправностей.

Выполнение условия баланса фаз является необходимым, но недостаточным для самовозбуждения схемы. Второе условие самовозбуждения состоит в том, что для существования автоколебательного режима ослабления сигнала, вносимое цепью обратной связи, должно компенсироваться усилителем. Иными словами, глубина обратной связи должна быть такой, чтобы потери энергии в контуре восполнялись полностью.

Данное условие самовозбуждения называют условием баланса амплитуд, оно выражается следующей формулой:

$$\beta \geq 1 / K_U, \quad (7.3)$$

где β – коэффициент передачи цепи обратной связи; K_U – коэффициент усиления усилителя без обратной связи.

Коэффициент β показывает, какая часть переменного напряжения контура подается на базу транзистора в установившемся режиме работы. Значение данного коэффициента определяется характеристиками катушек и описывается следующим выражением:

$$\beta = M / L_1, \quad (7.4)$$

где M – коэффициент взаимной индукции между катушками; L_1 – индуктивность катушки L_1 .

В генераторе, используемом в данной разработке, в качестве усилительного элемента используется транзистор $VT1$, включенный по схеме с общим эмиттером. Нагрузкой транзистора является параллельный колебательный контур $L2C2$. Этот контур используется как колебательная система, с помощью которой формируются колебания, и как избирательная цепь, от которой зависит частота и форма колебаний. Катушки индуктивности $L1$ и $L2$ образуют высокочастотный трансформатор. Кроме того, катушка $L1$ является элементом обратной связи, с помощью которого колебания подаются на базу транзистора, управление режимами работы схемы по току базы осуществляется резистором $R4$. Резисторы $R2$ и $R3$ образуют делитель напряжения. С его помощью на транзистор подается напряжение смещения U_0 , которым задается положение рабочей точки на вольт-амперной характеристике. Резистор $R5$ является температурной стабилизацией транзистора. Также $R5$ с конденсатором $C4$ образуют цепь автоматического смещения, которая осуществляет перевод генератора из мягкого режима самовозбуждения в жесткий. Конденсаторы $C1$ и $C3$ являются разделительными, и отделяют

постоянную составляющую тока питания от переменной составляющей колебания. Электропитание генератора осуществляется от источника постоянного напряжения E_k , регулирование питания схемы осуществляется резистором $R1$.

В данной работе используется режим неполного восстановления, при котором с выхода генератора наблюдается синусоидальное напряжение $U_{a0\delta}$, амплитудой от 20 до 200 мВ (в зависимости от характеристик трансформатора). В режиме неполного восстановления сердечник катушек $L1$ и $L2$ не полностью насыщается магнитным полем, что позволяет его использовать как магнитоэлектрический преобразователь. При внесении источника внешнего магнитного поля в оси катушек, сердечник начинает либо подмагничиваться, либо размагничиваться (в зависимости от полюса катушек и полюса внешнего источника), что ведет к резкому увеличению или спаду амплитуды на выходе генератора.

Описание принципиальной схемы амплитудного детектора

Амплитудным детектором (демодулятором) – называется устройство, предназначенное для преобразования амплитуды высокочастотного сигнала в низкочастотные колебания.

Амплитудный детектор (АД) предназначен для получения на выходе сигнала, пропорционального огибающей.

Детектирование заключается в выделении низкочастотного сигнала, который в неявной форме содержится в высокочастотном колебании. Детектирование сопровождается трансформацией (преобразованием) частотного спектра: на входе высокочастотное колебание, на выходе – низкочастотное, соответствующее передаваемому сигналу. Следовательно, детектирование требует применения нелинейного элемента, в токе которого возникает низкочастотный сигнал, и фильтра низких частот, выделяющего его.

Условно амплитудный детектор можно разделить на два устройства:

- выпрямитель, который предназначен для преобразования переменного напряжения, снимаемого с вторичной обмотки трансформатора, в знакопостоянное пульсирующее напряжение (полуволны синусоидальной формы);
- сглаживающий фильтр, который служит для преобразования пульсирующего напряжения, снимаемого с выхода выпрямителя, в выделенный низкочастотный сигнал.

Выходной высокочастотный сигнал с магнитоэлектрического преобразователя (датчика) имеет низкую величину колебаний в режиме неполной автогенерации от 50 до 300 мВ, вследствие этого не представляется возможным использовать типовые схемы выпрямителей (полупроводниковых), из-за не идеальности реальных вольтамперных характеристик нелинейных полупроводниковых элементов.

Реальные вольтамперные характеристики нелинейных элементов (таких как полупроводниковые диоды или транзисторы), применяющихся в амплитудных детекторах, значительно отличаются от требуемой ВАХ. В результате амплитудная характеристика детектора получается существенно нелинейной. У вольтамперных характеристик этих электронных приборов наблюдается ступенька

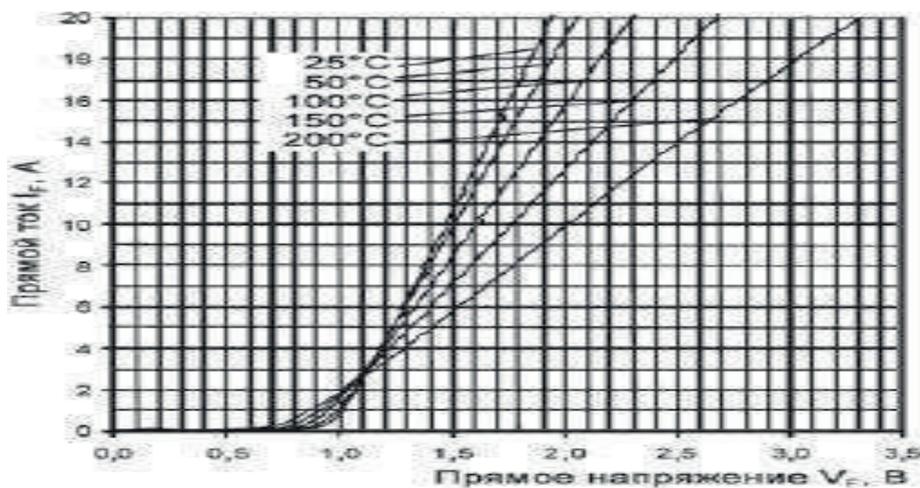


Рисунок 7.17 – Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода типа Шоттки

в районе 0,2...0,8 В. Наименьшей ступенькой обладают диоды Шоттки и обращенные диоды. Пример вольтамперной характеристики полупроводникового диода Шоттки приведен на рисунке 7.17.

Для выпрямления сигналов в рабочем диапазоне выходного сигнала датчика следует использовать прецизионные схемы выпрямления. В данной разработке была применена прецизионная схема прецизионного двухполупериодного выпрямителя на операционных усилителях (ОУ).

В таких устройствах выпрямляющий диод по-прежнему играет роль основного рабочего элемента, а ОУ, охваченный глубокой ООС, обеспечивает линейность передаточной характеристики и попутно значительное усиление сигнала (коэффициент передачи может достигать 30...40). Упрощенная схема и диаграмма работы такого детектора приведены на рисунке 7.18.

Узел на *DA1* осуществляет однополупериодное выпрямление входного сигнала. По цепи *VD2*, *R2*, независимо от ее сопротивления, протекает стабильный ток (генераторы стабильного тока на ОУ с ООС широко распространены), мгновенное значение уровня которого пропорционально мгновенной амплитуде входного сигнала $U_{вв}$. В связи с этим, выходное напряжение $U_{авв}$, снимаемое с резистора *R2* с точностью до фазы, повторяет тот полупериод входного сигнала, для которого диод *VD2* оказывается открытым. В приведенном случае отрицательный полупериод входного сигнала после инвертирования в *DA1* превращается в положительный и открывает диод *VD2*. Для другого полупериода *VD2* закрыт. Диод *VD1* выполняет вспомогательную функцию защиты от перегрузок *DA1* положительными сигналами и триггерного эффекта.

Для получения двухполупериодного преобразования схема на *DA1* должна быть дополнена еще одним узлом, представляющим собой обычный инвертирующий сумматор. В этом случае, получаемые с выхода первого узла положительные

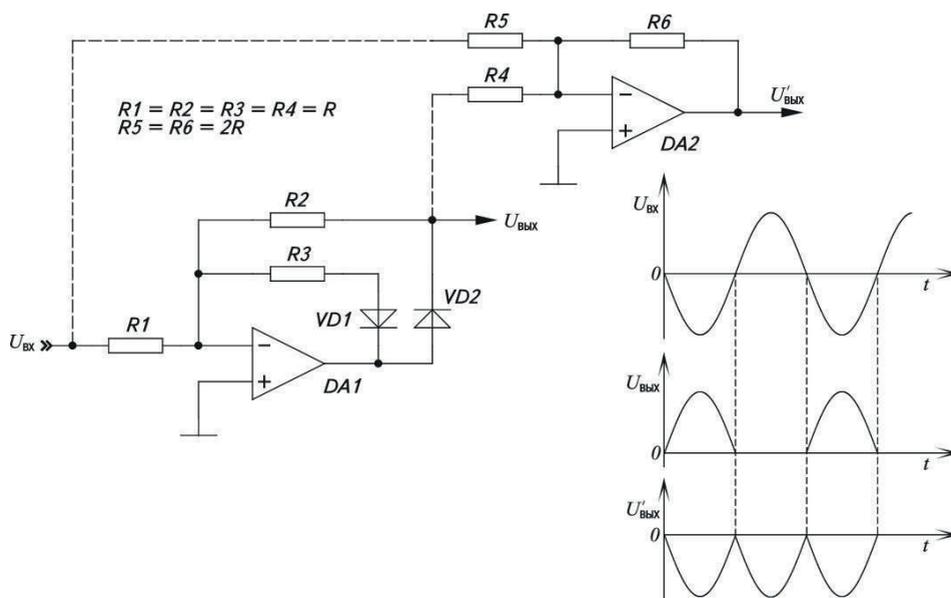


Рисунок 7.18 – Двухполупериодный прецизионный выпрямитель с диаграммами входных и выходных сигналов. Схема электрическая принципиальная

полуволны выпрямленного сигнала $U_{\text{а\u044d}}$, поступающая через резистор $R4$ в точку суммирования (инвертирующий вход $DA2$), подвергаются в $DA2$ усилению в два раза. Поступающий через $R5$ в ту же точку исходный сигнал $U_{\text{а\u044d}}$, не претерпевая амплитудных изменений в $DA2$, компенсирует наполовину сигнал $2U_{\text{вых}}$, образуя на выходе детектора только отрицательные импульсы, повторяющие по форме положительные и отрицательные полуволны исходного сигнала.

Одной из особенностей операционных усилителей является отсутствие ослабления сигнала, таким образом, на выходе выпрямителя сигнал равен по модулю сигналу входа. Таким образом, амплитуда выходного сигнала, снимаемого с двухполупериодного выпрямителя, описывается следующей формулой:

$$U_{\text{а\u044d}} = -|U_{\text{а\u044d}}|. \quad (7.5)$$

В качестве сглаживающего фильтра в данной разработке была использована схема интегратора на операционном усилителе, электрическая принципиальная схема данного устройства представлена на рисунке 7.19. Данная схема фильтрации сигнала относится к активным фильтрам. Несомненным преимуществом данной схемы является отсутствие ослабления входного сигнала.

Работа интегратора основана на том, что инвертирующий вход заземлён, согласно принципу виртуального замыкания. Через резистор $R1$ протекает входной ток $I_{\text{а\u044d}}$, в то же время для уравновешивания точки нулевого потенциала конденсатор будет заряжаться током одинаковым по величине $I_{\text{а\u044d}}$, но с противоположным знаком. В результате на выходе интегратора будет формироваться напряжение, до которого конденсатор заряжается этим током. Входное сопротивление интегратора

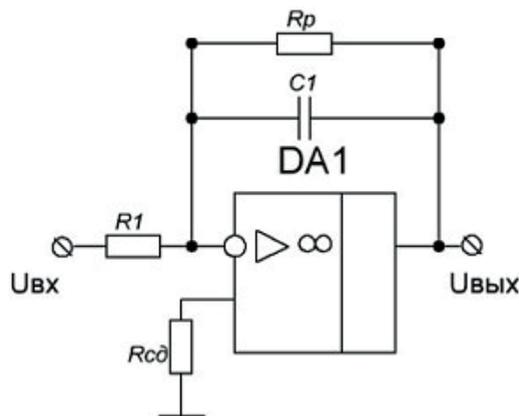


Рисунок 7.19 – Интегратор на операционном усилителе. Схема электрическая принципиальная

будет равно сопротивлению резистора $R1$, а выходное сопротивление будет определяться параметрами ОУ.

Основным недостатком интегратора на ОУ является явление дрейфа выходного напряжения. В основе данного явления лежит то, что конденсатор $C1$, кроме заряда входным током, заряжается различными токами утечки и смещения ОУ. Последствием данного недостатка является появление напряжения смещения на выходе схемы, которое может привести к насыщению ОУ. Для предотвращения дрейфа выходного напряжения конденсатор $C1$ шунтируют сопротивлением R_p .

Включение резистора $R_{\text{вд}}$ между землёй и неинвертирующим входом позволяет снизить входное напряжение смещения, за счёт уравнивания падения напряжения на входах ОУ величина $R_{\text{вд}} = R1 \square RP$, либо $R_{\text{вд}} = R1$ (при отсутствии RP). Величина резистора R_p выбирается из того, что постоянная времени $R_p C1$ должна быть значительно больше, чем период интегрирования, то есть $R1 C1$:

$$R_p C1 \square R1 C1. \quad (7.6)$$

Применяемый в интеграторе конденсатор выбирается с наименьшим током утечки.

Описание принципиальной схемы сравнивающего устройства

В качестве сравнивающего устройства была выбрана схема вычитающего усилителя с дифференциальным входом.

Преимуществом данной схемы является отсутствие ослабления выходного сигнала и возможность сравнения малых сигналов от 1 мВ.

Операционный усилитель обладает свойством усиливать дифференциальные и подавлять синфазные сигналы, одновременно поступающие на два его входа. Таким образом, на выходе устройства на основе ОУ можно получить усиленную разность входных напряжений, одновременно поступающих на инвертирующий

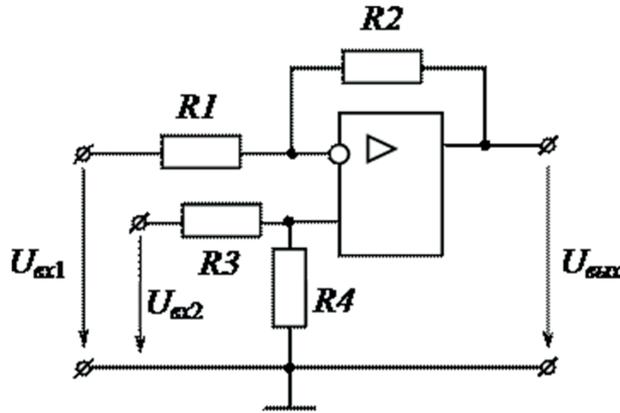


Рисунок 7.20 – Вычитающий усилитель с дифференциальным входом

и неинвертирующий входы. Схема усилителя с дифференциальным входом представлена на рисунке 7.20.

Если обеспечивается работа ОУ в пределах области усиления его передаточной характеристики, то рассматриваемое устройство можно считать линейным. С учетом этого для вывода выражения, связывающего выходное напряжение усилителя со входными, поступающими на два его входа, используется принцип суперпозиции.

Напряжение $U_{\dot{A}\dot{O}1}$ передается на выход через инвертирующий вход, поэтому можно записать:

$$U'_{\dot{A}\dot{O}\dot{\sigma}} = -U_{\dot{A}\dot{O}1} \frac{R_2}{R_1}. \quad (7.7)$$

Напряжение $U_{\dot{A}\dot{O}2}$ передается на выход через неинвертирующий вход. При этом нужно учесть коэффициент передачи делителя напряжения на резисторах R_3 и R_4 . С учетом этого можно записать:

$$U'_{\dot{a}\dot{o}\dot{\sigma}} = U''_{\dot{a}\dot{o}2} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right). \quad (7.8)$$

На основании (7.7) и (7.8) можно записать:

$$U_{\dot{a}\dot{o}\dot{\sigma}} = U'_{\dot{a}\dot{o}\dot{\sigma}} + U''_{\dot{a}\dot{o}\dot{\sigma}} = U_{\dot{a}\dot{o}} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) - U_{\dot{a}\dot{o}1} \frac{R_2}{R_1}. \quad (7.9)$$

При выполнении условия $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, напряжение на выходе равно:

$$U_{\dot{A}\dot{U}\dot{\sigma}} = U_{\dot{A}\dot{O}2} - U_{\dot{A}\dot{O}1}. \quad (7.10)$$

7.10. Расчет математической модели инерционной части информационного устройства

Инерционным звеном в системе является механизм разбраковки, принцип действия которого заключается в том, что электромагнит при подаче на него управляющего сигнала открывает заслонку лотка на конвейере, в которую проваливается дефектная деталь.

Математическая модель механизма разбраковки составлена на основе принципа Д'Аламбера:

$$R_{\dot{y}_i} = m \frac{d^2 h}{dt^2} + \alpha \frac{dh}{dt} + ch, \quad (7.11)$$

$$R_{\dot{y}_i} = K_{\dot{y}_i} \dot{h}^2, \quad (7.12)$$

где $R_{\dot{y}_i}$ – сила электромагнита; m – масса движущихся частей; h – перемещение якоря магнита; α – коэффициент вязкого трения; c – коэффициент жесткости пружины лотка, $c = 5$ кг/см; $K_{\dot{y}_i}$ – коэффициент конструктивных параметров электромагнита; I – сила тока в обмотке электромагнита.

При дальнейшем преобразовании выводится следующая формула:

$$\frac{K_{\dot{y}_i} I^2}{\dot{h}} = \frac{m d^2 h}{c dt^2} + \frac{\alpha dh}{c dt} + h \quad (7.13)$$

Подставив следующие переменные:

T_K – постоянная времени, способствующая колебательному процессу при неустановившемся режиме, $T_K = \sqrt{m / c}$;

$T_{\dot{A}}$ – постоянная времени, способствующая демпфированию колебаний при неустановившемся режиме, $T_{\dot{A}} = \alpha / \dot{h}$;

K_{\circ} – коэффициент усиления механизма разбраковки, $K_{\circ} = K_{\dot{y}_i} c$, получаем следующее тождество:

$$K_{\circ} I = T_K^2 \frac{d^2 h}{dt^2} + T_{\dot{A}} \frac{dh}{dt} + h. \quad (7.14)$$

Исходя из этого тождества, выводится следующее равенство баланса системы: при $T_{\dot{A}} > 2T_K$ переходной процесс происходит по двум экспонентам.

По приведённой выше математической модели был выбран электромагнит ЭМИС-1100 для разработанного механизма разбраковки. Внешний вид данного электромагнита приведен на рисунке 7.21. Параметры электромагнита представлены в таблице 7.3.



Рисунок 7.21 – Электромагнит однофазный переменного тока ЭМИС-1100

Таблица 7.3 – Технические характеристики электромагнита ЭМИС-1100

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальный ход якоря, мм	15/20/25/30
Номинальное тяговое усилие, Н	16...170
Номинальное рабочее напряжение, В	110, 127, 220, 380

Конструирование и подтверждение работоспособности экспериментальной модели ИС

Был собран макет датчика и амплитудного детектора для информационной системы обнаружения поверхностных дефектов ферромагнитных изделий. Внешний вид данного макета представлен на рисунке 7.22.

В качестве трансформатора для LC-автогенератора использовался дроссель Д268В. Питание схемы осуществлялось от лабораторного источника питания на 3,3 В. Питание в 9 В также было подведено к микросхеме операционных усилителей ВА10324А.

С выхода автогенератора в режиме неполного восстановления было получено пульсирующее синусоидальное напряжение, осциллограмма которого представлена на рисунке 7.23.

При приближении постоянного магнита к полюсам катушки можно наблюдать уменьшение амплитуды выходного сигнала, однако без последующей обработки регистрация данного изменения амплитуды затруднительна, вследствие этого и была применена схема амплитудного детектора. Сигнал с автогенератора преобразовывается в кривую изменения исходного сигнала, осциллограмма которой представлена на рисунке 7.24.



Рисунок 7.22 – Макет датчика и амплитудного детектора

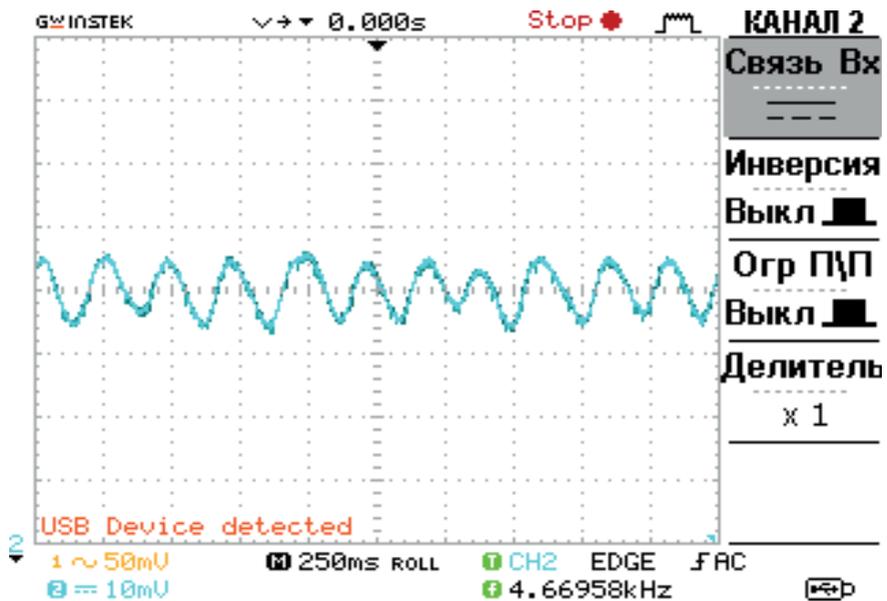


Рисунок 7.23 – Осциллограмма выходного сигнала LC-автогенератора. Данный сигнал имеет чувствительность к магнитному полю

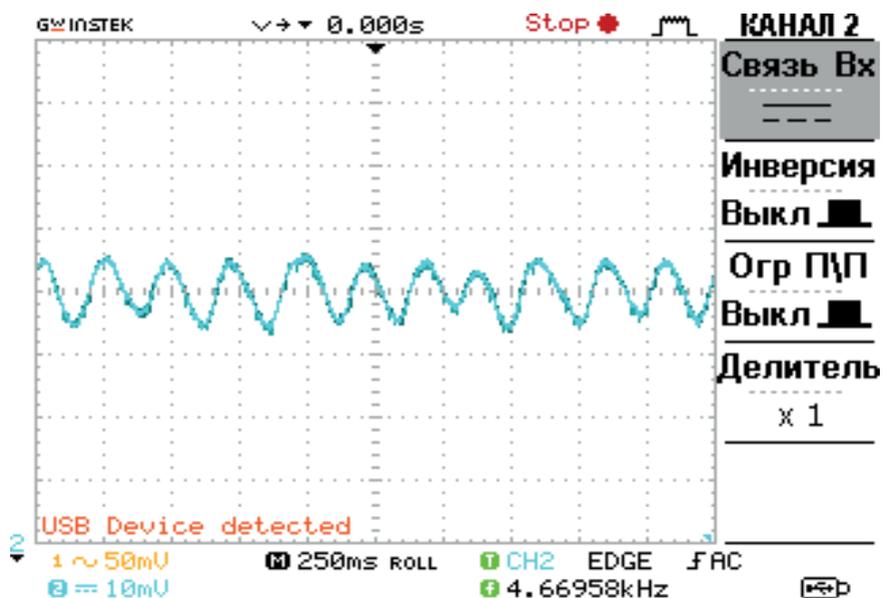


Рисунок 7.24 – Осциллограмма выходного сигнала амплитудного детектора

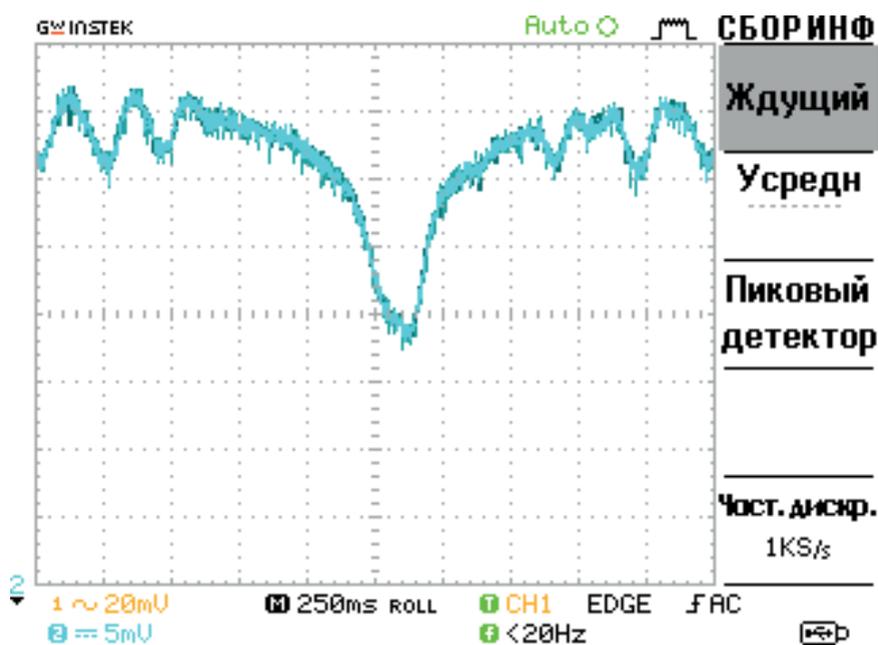


Рисунок 7.25 – Осциллограмма выходного сигнала амплитудного детектора при внесении в поле действия датчика дефектной детали

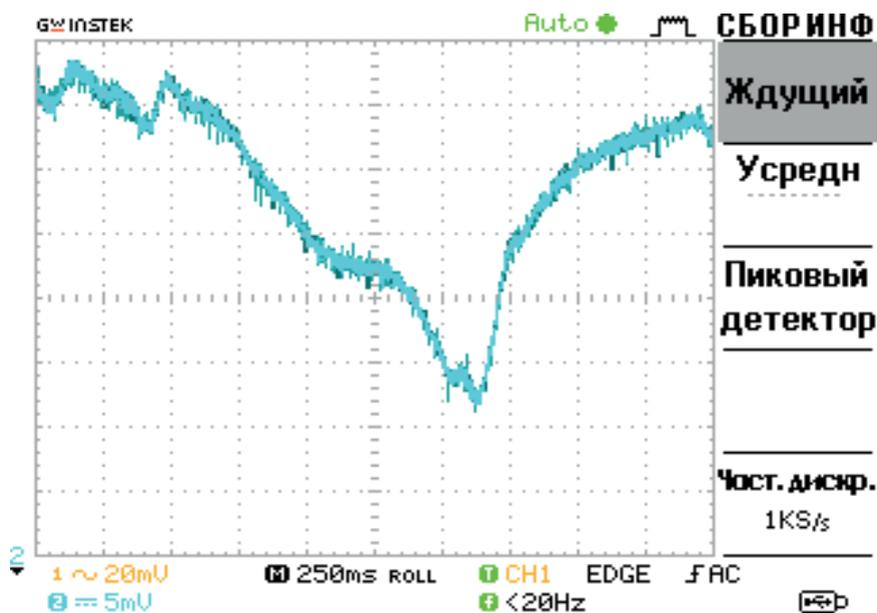


Рисунок 7.26 – Осциллограмма выходного сигнала амплитудного детектора при внесении в поле действия датчика бездефектной детали

Определение параметров и чувствительности модели при обнаружении поверхностных дефектов

На рисунках 7.25 и 7.26 представлены осциллограммы выходных сигналов с макета устройства при внесении в поле действия датчика дефектной и бездефектной детали. Можно увидеть, что деталь, обладающая дефектом из-за изменения своего состава, соответственно меняет свое магнитное поле, что приводит к изменению сигнала амплитудного детектора.

Таким образом, разработанная модель информационной системы обнаружения поверхностных дефектов, позволяет с высокой чувствительностью обнаруживать дефекты ферромагнитных изделий.

Таким образом, на основе приведенных исследований была разработана информационная система обнаружения поверхностных дефектов ферромагнитных изделий. В основе системы лежит использование LC-автогенератора с трансформаторной обратной связью в режиме неполного восстановления, как магнитоэлектрического преобразователя.

Для точной регистрации и анализа сигналов с датчика была применена прецизионная схема амплитудного детектора с выпрямителем и сглаживающим фильтром на операционных усилителях.

Для определения работоспособности системы был построен макет датчика и амплитудного детектора, которые показали свою работоспособность и высокую чувствительность к дефектам в ферромагнитных изделиях.

8. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

8.1. Основные понятия и требования к оптико-электронным датчикам

Информационное устройство – датчик – это элемент измерительного, сигнального, регулирующего или управляющего устройства, преобразующий контролируемую величину (температуру, давление, частоту, силу света, электрическое напряжение, ток и т. д.) в сигнал, удобный для измерения, передачи, хранения, обработки, регистрации, а иногда и для воздействия им на управляемые процессы. Это устройство, преобразующее входное воздействие любой физической величины в сигнал, удобный для дальнейшего использования [23, 26].

Различают три класса датчиков:

- аналоговые датчики, т. е. датчики, вырабатывающие аналоговый сигнал, пропорционально изменению входной величины;
- цифровые датчики, генерирующие последовательность импульсов или двоичное слово;
- бинарные (двоичные) датчики, которые вырабатывают сигнал только двух уровней: «включено/выключено» (иначе говоря, 0 или 1), получили широкое распространение благодаря своей простоте.

Требования, предъявляемые к датчикам:

- однозначная зависимость выходной величины от входной;
- стабильность характеристик во времени;
- высокая чувствительность;
- малые размеры и масса;
- отсутствие обратного воздействия на контролируемый процесс и на контролируемый параметр;
- работа при различных условиях эксплуатации;
- различные варианты монтажа.

Различают *аналоговые* и *дискретные* оптические датчики. У аналоговых датчиков выходной сигнал изменяется пропорционально внешней освещенности. Основная область применения – автоматизированные системы управления. На рисунке 8.1 показан внешний вид существующих оптических датчиков.

Датчики дискретного типа изменяют выходное состояние на противоположное при достижении заданного значения освещенности.



Рисунок 8.1 – Оптические датчики

Фотоэлектрические датчики могут быть использованы практически во всех отраслях промышленности. Датчики дискретного действия используются как своеобразные бесконтактные выключатели для подсчета, обнаружения, позиционирования и других задач на любой технологической линии.

Оптический бесконтактный датчик регистрирует изменение светового потока в контролируемой области, связанное с изменением положения в пространстве каких-либо движущихся частей механизмов и машин, отсутствия или присутствия объектов. Благодаря большим расстояниям срабатывания оптические бесконтактные датчики нашли широкое применение в промышленности и не только.

Оптический бесконтактный датчик состоит из двух функциональных узлов, приемника и излучателя. Данные узлы могут быть выполнены как в одном корпусе, так и в различных корпусах.

По методу обнаружения объекта фотоэлектрические датчики подразделяются на четыре группы:

1) метод пересечения луча – в этом методе передатчик и приемник разделены по разным корпусам, что позволяет устанавливать их напротив друг друга на рабочем расстоянии. Принцип работы основан на том, что передатчик постоянно посылает световой луч, который принимает приемник. Если световой сигнал датчика прекращается, вследствие перекрытия сторонним объектом, приемник немедленно реагирует, меняя состояние выхода.

2) метод отражения от рефлектора – в этом методе приемник и передатчик датчика находятся в одном корпусе. Напротив датчика устанавливается рефлектор (отражатель). Датчики с рефлектором устроены так, что благодаря поляризационному фильтру они воспринимают отражение только от рефлектора. Эти рефлекторы работают по принципу двойного отражения. Выбор подходящего рефлектора определяется требуемым расстоянием и монтажными возможностями.

Посылаемый передатчиком световой сигнал, отражаясь от рефлектора, попадает в приемник датчика. Если световой сигнал прекращается, приемник немедленно реагирует, меняя состояние выхода.

3) метод отражения от объекта – в этом методе приемник и передатчик датчика находятся в одном корпусе. Во время рабочего состояния датчика все объекты, попадающие в его рабочую зону, становятся своеобразными рефлекторами. Как только световой луч, отразившись от объекта, попадает на приемник датчика, тот немедленно реагирует, меняя состояние выхода.

4) метод фиксированного отражения от объекта – принцип действия датчика такой же, как и у «отражения от объекта», но более чутко реагирующий на отклонение от настройки на объект.

По своему назначению фотодатчики делятся на две основные группы: датчики общего применения и специальные датчики. К специальным относятся типы датчиков, предназначенные для решения более узкого круга задач. К примеру, обнаружение цветной метки на объекте, обнаружение контрастной границы и т. д.

Задача датчика обнаружить объект на расстоянии. Это расстояние варьируется в пределах 0,3–50 м, в зависимости от выбранного типа датчика и метода обнаружения.

Схемы включения датчиков (показаны на рисунке 8.2).

Непосредственное использование выходного сигнала датчика для воздействия на последующие элементы автоматической системы (и даже для непосредственного измерения и сравнения) не всегда возможно. Преобразование выходной величины датчика в удобную для последующего использования осуществляется в измерительных схемах.

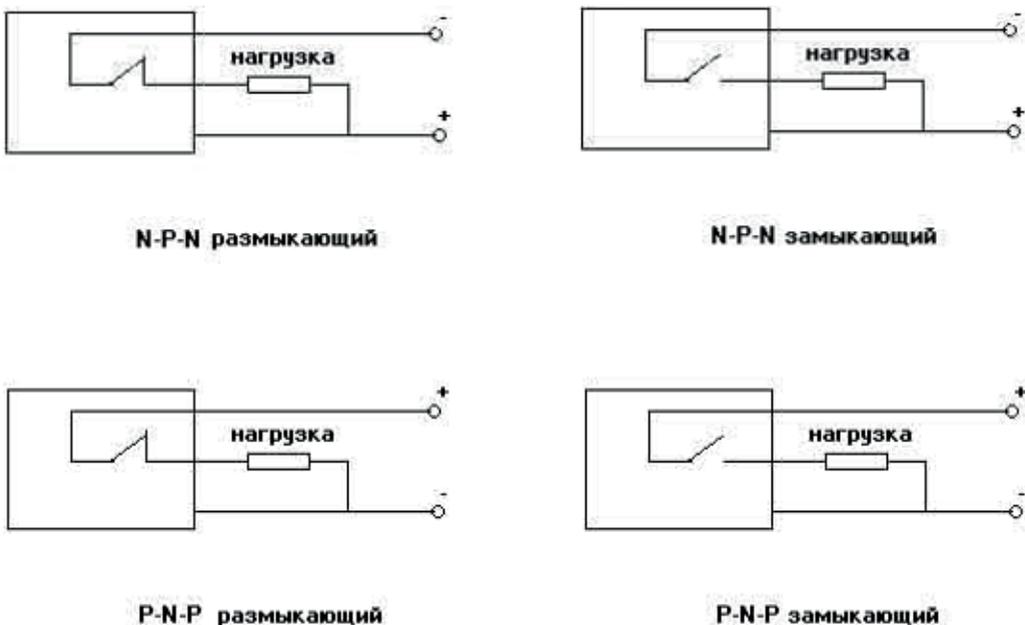


Рисунок 8.2 – Схемы включения датчиков

Выходной транзистор PNP-типа с открытым коллектором. Нагрузка подключается между выходом и общим, минусовым, проводом (в исходном состоянии нагрузка отключена). Выпускаются две его модификации: кабельное соединение и разъемное соединение.

Выходной транзистор NPN-типа с открытым коллектором. Нагрузка подключается между выходом и общим, плюсовым, проводом (в исходном состоянии нагрузка отключена). Выпускаются две его модификации: кабельное соединение и разъемное соединение.

Применение фотоэлектрических датчиков.

Работа на просвет

В этом типе датчиков приемник и излучатель расположены напротив друг друга таким образом, что световой поток из излучателя попадает непосредственно в приемник. Положение объекта определяется, когда он перекрывает луч от излучателя в приемник. Настройка взаимного расположения датчиков заключается в том, чтобы максимальное количество света от излучателя попадало в приемник. Это означает, что при расположении приемника и излучателя друг напротив друга, свет от последнего попадал бы в центр поля зрения приемника. В ранних моделях, когда датчики использовали немодулированное излучение, требование по настройке взаимного расположения пары излучатель – приемник сослужило этому виду датчиков плохую службу. Однако сегодня, имея интенсивные и модулированные излучатели, проводить настройку датчиков, работающих на просвет, становится совсем несложным делом.

Под рабочим диапазоном датчика этого типа подразумевается максимальное расстояние между излучателем и приемником, при котором может происходить работа датчика. Эффективный луч датчика – это часть полного луча, излучаемого излучателем, которая необходима для надежного срабатывания, когда объект перекрывает луч. Эффективный луч датчиков, работающих на просвет – это цилиндр, соединяющий линзы излучателя и приемника (это может быть также конус, если линзы излучателя и приемника имеют разный диаметр). Эффективный луч не может выходить за пределы диаграммы направленности излучателя и поля зрения приемника.

Эффективный луч стандартных фотоэлектрических датчиков слишком большой, чтобы обнаруживать малые объекты, проверять малые профили и позиционировать объекты с высокой точностью. В таких случаях линзы датчика могут быть частично перекрыты маской для уменьшения эффективного размера луча. Некоторые модели фотоэлектрических датчиков, работающих на просвет, имеют специальные адаптеры для этого. Такой адаптер может быть изготовлен, если просверлить или вырезать отверстие или щель в тонкой металлической пластине и расположить ее напротив центра линз. При выборе адаптера следует помнить, что современные фотоэлектрические датчики имеют интенсивное модулированное излучение, которое может проникать через множество неметаллических материалов под различными углами.

Однако использование маски снижает энергию луча датчика пропорционально снижению площади линз, которые перекрывает датчик. Потери энергии увеличиваются в два раза, если маска установлена как на излучателе, так и на приемнике.

Прямоугольные щелевые маски в меньшей степени снижают световую энергию от датчика, чем круглые маски того же диаметра. Поэтому по возможности стоит применять именно прямоугольные маски. Прямоугольные маски применяются, когда объект проходит через луч в определенном положении, например в задаче определения края объекта. Однако когда небольшой объект проходит через луч датчика в произвольном положении, применяется круглая маска.

Если объект, положение которого необходимо определить всегда проходит близко к приемнику или к излучателю, то маску можно поставить только на один из них. В этом случае эффективный луч датчика приобретает форму конуса. Однако возможно совместить необходимость иметь большую площадь линзы датчика и малый размер эффективного луча для определения положения самых малых объектов. Наиболее простым путем такого совмещения является использование волоконной оптики в фотоэлектрических датчиках, работающих на просвет. Модулированные светодиоды высокой мощности, используемые в некоторых фотоэлектрических датчиках, могут создавать флуктуации световой энергии вокруг объекта, равные или несколько большие, чем эффективный луч. Это еще один повод, чтобы проверить, что размер эффективного луча датчика меньше размеров объекта. Использование лазерных диодов в излучателях датчиков, работающих на просвет, — другая альтернатива применению щелевых масок. Лазерные датчики сами по себе имеют узкий луч во всем рабочем диапазоне. Они применяются для позиционирования малых объектов и для прецизионного определения положения объектов.

Работа на обратное отражение

Фотоэлектрические датчики, срабатывающие на обратное отражение, содержат в одном корпусе схему излучателя и приемника. Световой луч распространяется от излучателя до обратного отражателя, затем попадает в приемник. Так же как и в фотоэлектрических датчиках, работающих на просвет, объект обнаруживается, когда он пересекает световой луч. Диапазоном расстояний у этого типа датчиков считается расстояние от датчика до отражателя. Эффективным лучом в датчиках, срабатывающих на обратное отражение, является конус, формой совпадающей с фигурой, соединяющей линзы датчика и отражатель. Отраженный луч обычно не сфокусированный и поэтому датчики, срабатывающие на обратное отражение, применяют для обнаружения достаточно больших объектов. Вместе с тем, когда требуется малый эффективный размер луча, то, как и в датчиках, работающих на просвет, используются лазерные диоды в качестве источников света.

Большинство обратных отражателей сделано из множества маленьких призм, образованных углом куба и каждая из этих призм имеет три взаимно перпендикулярных отражающих поверхности. Когда световой луч падает на призму, три

отражающие поверхности отражают луч в обратном направлении параллельно падающему лучу и отраженный луч поступает в приемник. Иными словами, обратный отражатель отражает луч в том направлении, откуда он пришел. В основном, обратные отражатели сделаны из литого пластика и производятся различных размеров, форм и цветов. Подобные отражатели используются на дорогах и в качестве катафотов на транспортных средствах. Такие катафоты ярко светятся для водителя, когда свет передних фар машины попадает на них и отражается в обратном направлении кубическими призмами. Предупредительные знаки на дорогах также часто покрывают обратно отражающей пленкой, которая содержит литые микроскопические кубические призмы или стеклянные шарики. Прозрачная сфера из стекла также отражает падающий на нее луч в обратном направлении, но отражающее покрытие их шариков менее эффективно, чем из кубических призм.

Зеркальные поверхности также могут использоваться в качестве отражателей для датчиков. Однако луч от зеркальной поверхности отражается под тем же углом, что и падающий луч, но в противоположном, относительно нормали к поверхности зеркала, направлении. Для того чтобы луч попал обратно на датчик, необходимо, чтобы зеркало было расположено строго перпендикулярно лучу. С другой стороны, обратный отражатель посылает луч обратно в датчик, даже если расположен под углом примерно 20 градусов от перпендикуляра. Это свойство делает настройку таких отражателей быстрой и легкой.

Хороший отражатель возвращает в датчик примерно в 3000 раз больше света, чем лист белой бумаги. Вот почему фотоэлектрические датчики этого типа срабатывают только тогда, когда предмет перекрывает луч, отраженный от отражателя. Однако если объект имеет зеркальную либо блестящую поверхность, то он может пройти через луч датчика и не быть обнаруженным. Если блестящий объект имеет плоские стороны и проходит через луч фотоэлектрического датчика в определенном положении, то может произойти ситуация, когда блестящая поверхность объекта отразит падающий луч обратно в приемник фотоэлектрического датчика. Вероятность ложных срабатываний такого рода может быть существенной, если поверхность блестящего объекта круглая или объект попадает в поле луча в случайном положении.

Благодаря развитию светодиодной технологии увеличивается использование в фотоэлектрических датчиках светодиодов видимого диапазона. Когда используется видимое излучение, фотоэлектрический датчик виден как вспышка в отражателе. Когда от рефлектора идет отраженный луч, это означает, что фотоэлектрический датчик настроен правильно. Этот принцип так же работает, когда источник видимого света используется в фотодатчиках, работающих на просвет. Обратный отражатель ставится перед линзой приемника и излучатель поворачивается таким образом, чтобы был виден луч в обратном отражателе. Затем отражатель убирается и пара датчиков – приемник и излучатель остаются в положении точной настройки.

Поляризационные фильтры также часто применяются в тех случаях, когда используется излучатель датчика видимого диапазона. Поляризационный фильтр, используемый с фотоэлектрическим датчиком, срабатывающим на обратное отражение, может значительно сократить число ложных срабатываний. Прежде всего, расположите поляризационные фильтры напротив излучателя и приемника, затем поверните фильтры таким образом, чтобы плоскости поляризации фильтров были расположены на 90 градусов относительно друг друга. Свет от излучателя, проходя через поляризационный фильтр, обладает вертикальной поляризацией. Когда свет отражается от обратного отражателя, его плоскость поляризации поворачивается на 90 градусов. И только такой поляризованный свет может пройти через поляризационный фильтр, расположенный на приемнике. Когда поляризованный свет отражается от блестящей поверхности, его плоскость остается в том же положении, и он не может пройти через второй поляризационный фильтр.

Эта схема эффективно снижает помехи, связанные с бликами, однако, так же как и светофильтр, снижает мощность излучения более чем на 50 %. Это становится существенным, когда вокруг датчика большая запыленность или объект находится на большом расстоянии. Следует также помнить, что фотоэлектрические датчики с поляризационным фильтром работают только в паре с обратным отражателем, отражающие плоскости которого образованы гранями куба.

Работа на рассеянное отражение

Фотоэлектрические датчики, срабатывающие на рассеянное отражение, обнаруживают объект, расположенный перед датчиком по отраженному от объекта излучению самого датчика. Свет от излучателя падает на поверхность и отражается под самыми разными углами, так что некоторая доля рассеянного от поверхности объекта излучения попадет в приемник датчика. Схема работы с рассеянным отражением не столь эффективна, поскольку только малая часть света от излучателя попадает в приемник. К тому же подобные датчики подвержены ложным срабатываниям от блестящих поверхностей. Также диапазон срабатывания от яркого белого объекта будет значительно больше, чем от черного.

Многие модели датчиков используют линзы, чтобы сделать пучок света от излучателя более узким и интенсивным и тем самым поднять долю света, которая в результате приходит на приемник. Одновременно с тем, что использование линз увеличивает рабочее расстояние датчика, одновременно с этим уменьшается критический угол распространения бликов от блестящих поверхностей. Это происходит по той причине, что отражения от блестящих поверхностей более направленные и напоминают отражения от зеркальных поверхностей.

Схемы работы оптических датчиков (рисунок 8.3)

Оптические бесконтактные выключатели состоят из двух функционально законченных блоков – источника излучения и приемника этого излучения.

Схема оптического датчика состоит из следующих элементов:

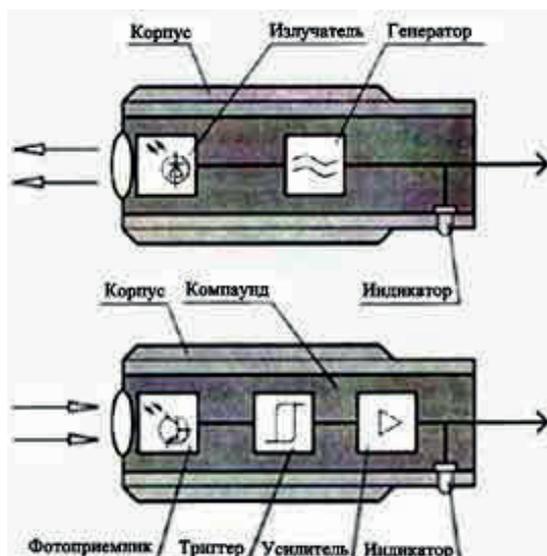


Рисунок 8.3 – Схемы оптических датчиков

1. Генератор вырабатывает последовательность электрических импульсов, поступающих на излучатель.

2. Излучатель о светодиод инфракрасного или оптического (красного) диапазона, создающий излучение.

3. Индикатор показывает наличие напряжения питания на излучателе.

4. Фотоприемник воспринимает излучение и преобразует его в электрический сигнал.

5. Триггер обеспечивает необходимую крутизну фронта сигнала переключения и значение гистерезиса.

6. Усилитель увеличивает амплитуду выходного сигнала до необходимого значения. В качестве коммутационных элементов используются мощные транзисторы.

7. Светодиодный индикатор показывает включенное/выключенное состояние выключателя, обеспечивает контроль работоспособности, оперативность настройки и ремонта оборудования.

8. Компаунд обеспечивает необходимую степень защиты от проникновения твердых частиц и воды. Корпус обеспечивает монтаж выключателя, защищает от механических воздействий. Выполняется из полиамида, комплектуется метизными изделиями.

Оптические датчики могут быть трех типов:

1. Моноблочный датчик

Приемник принимает рассеянный световой луч источника излучения, отраженный от управляющего объекта. При этом излучатель и приемник расположены в одном корпусе (рисунок 8.4).



Рисунок 8.4 – Моноблочный датчик

Расстояние воздействия таких выключателей до 1000 мм. При определении расстояния воздействия в качестве управляющего объекта используется пластина размером 100×100 мм, изготовленная из металла, имеющего темно-серую матовую поверхность. Эффективность работы датчика зависит от расстояния до контролируемых деталей и площади отражения. Кроме отражательной способности материала на чувствительность метода контроля влияют: задымленность, атмосферные осадки и т. п. Для устранения влияния посторонних фоновых объектов на работоспособность выключатели снабжены регулировкой чувствительности приемника.

2. Моноблочный поляризованный:

1) катафот закреплен неподвижно, а выключатель срабатывает на прерывание управляющим объектом луча, отраженного от катафота (рисунок 8.5).



Рисунок 8.5 – Моноблочный поляризованный датчик

Следует обратить внимание на то, что выключатель не воспринимает отраженный свет ни от одного объекта, кроме катафота, который может быть установлен в любом месте;

2) катафот установлен на управляющем объекте. В этом случае все другие объекты для выключателя являются невидимыми. Это делает выгодным использование выключателя в системах охранной сигнализации. При определении расстояния воздействия в качестве управляющего объекта для выключателей, работающих на поляризованном свете, используется катафот, поставляемый изготовителем. Максимальная дистанция переключения определяется в данном случае как расстояние между выключателем и катафотом.

3. Двухблочный

Источник излучения и приемник расположены в отдельных корпусах. Любой предмет, прерывающий прямой световой луч от источника к приемнику, вызывает изменение электрического сигнала на выходе приемника (рисунок 8.6).

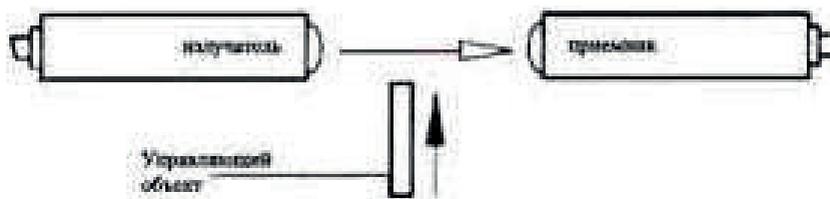


Рисунок 8.6 – Двухблочный датчик

Расстояние воздействия таких выключателей не зависит от материала управляющего объекта. Максимальная дистанция переключения определяется как расстояние между источником излучения и приемником и составляет 16 м. Кроме того, выключатели этого типа имеют импульсный синхронизатор, позволяющий работать при очень сильном внешнем освещении.

Оптические датчики барьерного типа

В датчиках с таким принципом работы передатчик и приёмник разделены по разным корпусам, что позволяет устанавливать их друг против друга на рабочем расстоянии (рисунок 8.7). Принцип работы основан на том, что передатчик постоянно посылает световой луч, который принимает приёмник. Если световой луч излучателя прерывается вследствие перекрытия сторонним объектом, приёмник немедленно реагирует, меняя состояние выхода.

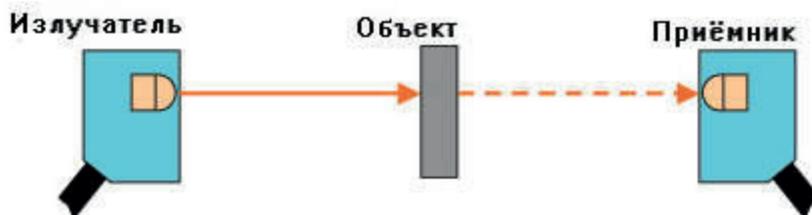


Рисунок 8.7 – Оптические датчики барьерного типа

Достоинства:

- большая дальность действия (несколько десятков метров);
- надёжное обнаружение объектов в пыльных и влажных помещениях;
- обнаружение небольших объектов;
- обнаружение объектов с высокой отражательной способностью;
- объект может не отражать и иметь любой цвет.

Недостатки:

- трудности при установке из-за наличия двух компонентов.

Рефлекторные оптические датчики

Принцип работы датчиков такого типа основан на том, что световой луч отражается от рефлектора, а отражённый детектируется датчиком (рисунок 8.8). Применение лазерных диодов в фотоэлектрических датчиках с отражением луча от рефлектора позволяет добиться значительного расстояния срабатывания при

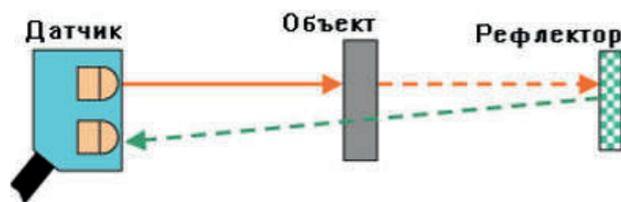


Рисунок 8.8 – Рефлекторный датчик

одновременном сохранении высокого разрешения, а использование поляризационных фильтров – избежать сложных ситуаций при обнаружении ряда объектов. Эти датчики характеризуются очень низким гистерезисом. Даже незначительный свет, вернувшийся от отражателя и прошедший через прозрачный объект, надёжно детектируется.

Достоинства:

- лёгкая установка;
- детектирование прозрачных объектов;
- малые искажения при наклонах и изменения цвета объекта.

Недостатки:

- ненадёжное определение небольших объектов на больших расстояниях;
- проблемы обнаружения объектов из деполаризационных материалов (плексиглас, ламинированная плёнка).

Диффузионный светоотражающий оптический датчик

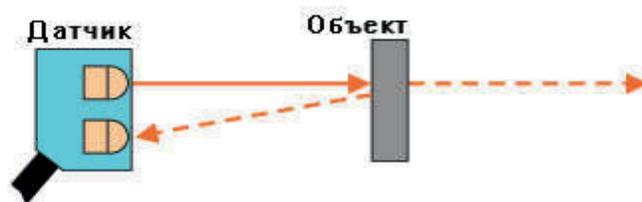


Рисунок 8.9 – Диффузионный оптический датчик

Чувствительность датчиков данного типа изменяется с помощью потенциометра. Светлые объекты отражают больше света, чем тёмные, и, кроме того, светлый объект может быть обнаружен на большем расстоянии. Поэтому чтобы достичь подобных результатов с тёмным объектом, чувствительность датчика увеличивают с помощью вращательного потенциометра.

Следует отметить, что для диффузионных датчиков определённую проблему составляет распознавание тёмных объектов на светлом заднем фоне. Также существуют определённые проблемы с обнаружением зеркальных предметов со сложной геометрией поверхности и с влиянием внешних источников освещения.

Достоинства:

- лёгкая установка (не нужно устанавливать датчик с противоположной стороны);
- надёжное определение светлых объектов на черном фоне.

Недостатки:

- отсутствие подавления переднего и заднего фона;
- проблемы с определением черных объектов на светлом фоне.

Оптический датчик смещения

Конструкция датчиков смещения разработана для реализации двух задач, выполняемых датчиками: максимальная точность измерений и высокая скорость обработки данных при измерениях в диапазоне нескольких миллиметров. В конструкции датчиков расстояния Optex-FA использован триангуляционный метод измерения. Световой пучок направляется на поверхность тестируемого объекта (источником света может быть, например, лазерный диод). В корпусе датчика установлена оптика приемника, которая принимает отраженные лучи на светочувствительном элементе (рисунок 8.10). В зависимости от положения отраженного луча и известной геометрии определяется расстояние до тестируемого объекта. Различают три типа оптики приемника датчика смещения: PSD, CMOS и CCD.

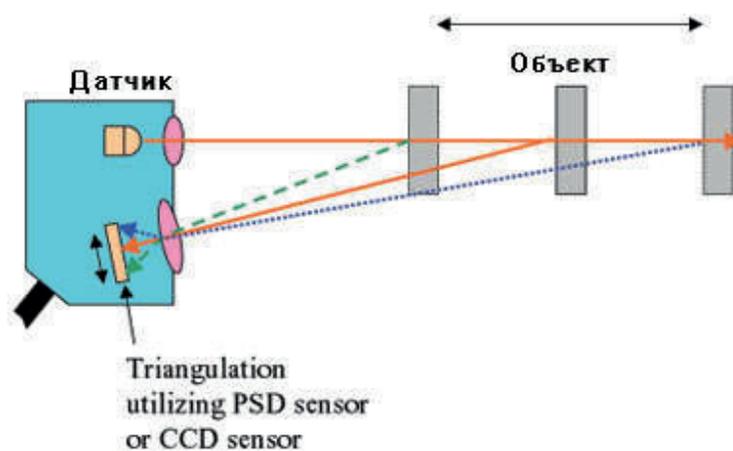


Рисунок 8.10 – Оптический датчик смещения

Достоинства:

- высокое разрешение и точность при работе с любыми материалами (матовыми, блестящими, светлыми и темными поверхностями);
- высокая надежность измерений даже при сильной контрастности;
- портативность габаритных размеров датчиков;
- высокая линейность.

Оптоволоконный датчик

Электрическая часть фотозлектрических датчиков с оптоволоконным кабелем находится в доступном и безопасном месте, а приёмник и передатчик вынесены непосредственно в зону детектирования (рисунок 8.11). Они передают световой сигнал к усилителю по оптоволоконному кабелю. Для этих датчиков характерны все методы детектирования (дифракционный, на основе пересечения

луча и т. д.). Фотодатчики с оптоволоконном могут применяться при ударных воздействиях, вибрации, высокой температуре и сильных магнитных полях в зоне измерения, а также в условиях ограниченного пространства для установки датчика.



Рисунок 8.11 – Оптоволоконный датчик

Достоинства:

- нечувствительность к вибрациям и ударам;
- лёгкая установка;
- шумозащищённость (оптический кабель защищён от электрических и магнитных шумов);
- гибкий волоконно-оптический кабель.

Недостатки:

- нестойкость к некоторым химическим веществам;
- возможность накопления статического заряда.

Цифровой оптический датчик (рисунок 8.12)

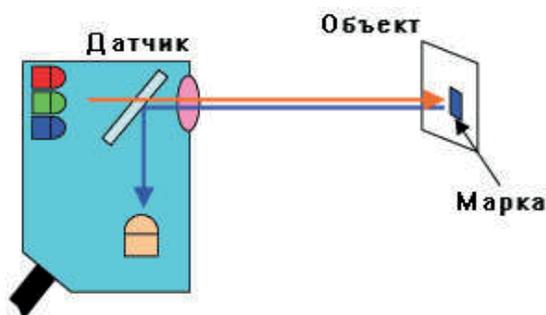


Рисунок 8.12 – Цифровой оптический датчик

Основные требования к оптическому датчику:

- RGB светодиоды выбираются автоматически для получения оптимального качества изображения;
- частота переключений 250 мк/сек;
- простая настройка, автоматический режим обучения;
- 8 групп параметров настройки.

Оптико-электронными называются приборы, в которых обработка информации, содержащейся в потоке излучения, сопровождается преобразованием

лучистой энергии в электрическую. Благодаря этому образуется единый оптико-электронный тракт обработки информации.

Оптико-электронные приборы представляют собой обширную группу устройств, основанных на самых современных методах преобразования лучистой энергии в электрическую, использования новых квантовых источниках излучения, последних достижениях микроэлектроники.

Они значительно расширили пределы использования лучистой энергии. Благодаря высокой чувствительности, малой инерционности, разнообразию конструктивных форм и методов измерений, оптико-электронные приборы сделали возможным применение лучистой энергии для автоматизации производственных процессов, создания новой автоматической контрольно-измерительной аппаратуры и проведения новых видов научных исследований.

Используемая в промышленности оптико-электронная аппаратура способствует повышению качества продукции и эффективности производства.

Расширение производства и применение оптико-электронных приборов привело к необходимости подготовки специалистов, деятельность которых связана с обработкой оптической информации в электронных устройствах.

Оптико-электронные приборы очень разнообразны по устройству, принципу действия и применению. Развитие оптико-электронных приборов приводит к появлению новых устройств и возможности новых областей применения.

Существует ряд основных признаков, которые используются для классификации оптико-электронных приборов. Одним из основных признаков классификации может служить используемая область спектра: ультрафиолетовая (1–380 нм), видимая (380–780 нм) и инфракрасная (780 нм – 1 мм).

Ширина интервала длин волн, где прибор обладает заданной чувствительностью, позволяет подразделить приборы на спектральные и интегральные. Спектральные приборы разлагают исследуемое излучение в спектр, фиксируют положение отдельных его участков и измеряют интенсивность того или иного участка спектра. Действие интегральных приборов основано на использовании неразложенного спектра излучения.

Способ использования информации определяет, является ли прибор автоматическим, где действие человека по использованию информации либо полностью устранены, либо значительно облегчены и упрощены, или индикационными, где прибор выдает информацию, а решение о действиях при данной информации возлагается на человека.

В зависимости от используемого источника облучения предмета, оптико-электронные приборы подразделяются на две основные группы: группу активных, в которых используется искусственный источник излучения, и группу пассивных, воспринимающих собственное излучение объектов и фонов, либо отраженное ими излучение естественных источников (например, Солнца). Такое деление приборов оказалось наиболее подходящим для приборов специального назначения.

Основные признаки классификации не являются единственными. Приборы, например, могут быть подразделены по характеру выполняемых функций на информационные, измерительные и следящие. Информационные приборы преобразуют с максимальной точностью все детали излучающего объекта и фона в электрический сигнал, по которому восстанавливается видимое изображение или исследуются характеристики излучения. Измерительные приборы предназначены для измерения только некоторых характеристик объектов при отображении их в воспринимаемом прибором излучении (размеров, прозрачности, скорости и т. д.). С помощью приборов следящей группы осуществляется автоматическое регулирование технологических процессов и автоматическое сопровождение излучаемых объектов. Для них характерно наличие исполнительных устройств, с помощью которых производятся действия, соответствующие полученной информации.

Часто существенной оказывается классификация по используемому в приборе явлению, сопутствующему распространению лучистого потока в различных средах: преломлению, поглощению, отражению, интерференции, люминесценции, поляризации. В таких случаях приборы называют, соответственно, интерференционными, люминесцентными, поляризационными и др.

Кроме основной классификации, подразделяющей все оптико-электронные приборы на определенные группы, существуют частные классификации в пределах каждой группы. Разветвленную классификацию имеют, например, спектральные приборы. Очень обширна классификация каждой группы приборов, подразделенных по используемой области спектра.

Деление приборов по каким-либо основным признакам не исключает того, что определенная по одному признаку группа приборов может, в свою очередь, подразделяться по другим основным признакам. Спектральные приборы могут быть автоматическими и индикационными, активными и пассивными.

Частные классификации различных групп рассматриваются при изучении приборов.

Требования, предъявляемые к приборам различных групп, могут сильно отличаться в зависимости от назначения и вида приборов. Насколько разнообразны оптико-электронные приборы, настолько и различна формулировка этих требований. При классификации по основным признакам следует учитывать только общие для данной группы требования, соответствующие выполняемым функциям.

Как уже было отмечено, информационные приборы должны обеспечивать наиболее точное воспроизведение всех деталей объекта. Подобным же образом от измерительных приборов требуется наибольшая точность измерений, а от следящих – точность воспроизведения выходного сигнала объекта.

Во всем оптико-электронном тракте приборов, наряду с полезной информацией, присутствуют помехи. Во многих случаях сигнал оказывается настолько малым по сравнению с уровнем помех, что нормальное функционирование приборов возможно лишь при специальных методах обработки информации, которые

позволяют наилучшим образом выделить сигнал и ослабить влияние помех. Такие методы обработки называют оптимальными. Для определения оптимальных параметров прибора надо знать характеристики сигналов и помех, приведенные ко входу системы, требуемый закон преобразования полезного сигнала и допустимые значения искажений в выходном сигнале.

8.2. Основные энергетические и световые характеристики излучения

Кратко перечислим основные определения и обозначения энергетических величин (в скобках указана их единица измерения).

Потоком излучения (мощностью излучения, лучистым потоком, потоком), \hat{O}_A Φ (Вт) называется количество излучаемой, поглощаемой или переносимой в единицу времени энергии [58]:

$$\hat{O}_a = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (8.1)$$

где Q – энергия излучения, Дж.

Поток в интервале длин волн от $\lambda + \Delta\lambda$ обозначается $\Phi(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$ или $\Phi(\lambda)$.

Спектральная плотность потока Φ_λ (Вт·мкм⁻¹) помечается индексом λ :

$$\hat{O}_e = \frac{\Delta \hat{O}(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)}{\Delta\lambda}. \quad (8.2)$$

Поток, оцененный по создаваемому им зрительному ощущению, называется световым потоком Φ_s (лм).

Энергетической силой излучения I_e (Вт·ср⁻¹) называется поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла ω (ср):

$$I_e = \frac{\Delta \hat{O}}{\Delta \omega}. \quad (8.3)$$

Силой света I_s (кд, лм·ср⁻¹) называется световой поток, отнесенный к единице телесного угла:

$$I_s = \frac{\Delta \hat{O}_s}{\Delta \omega}. \quad (8.4)$$

Сохраняется указанный для потока излучения смысл обозначений I_λ и $I(\lambda)$.

Поверхностной плотностью потока излучения (энергетической светимостью) M (Вт·м⁻²) называется отношение потока излучения, испускаемого в полусфере элементом поверхности к площади Δs (м²) этого элемента:

$$i = \frac{\Delta \hat{O}}{\Delta s}. \quad (8.5)$$

Светимостью (светностью) M_s (лм·м⁻²) называют поверхностную плотность светового потока.

Энергетической освещенностью (облученностью) E_e ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) называется отношение потока излучения, падающего на элемент поверхности, к площади этого элемента:

$$A_a = \Delta \hat{O} / \Delta S. \quad (8.6)$$

Освещенностью E_e (лк, $\text{лм}\cdot\text{м}^{-2}$) называется отношение светового потока, падающего на элемент поверхности, к площади этого элемента.

Спектральные плотности энергетической светимости и энергетической освещенности ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{мкм}^{-1}$) равны:

$$I_{\lambda} = \Delta I / \Delta \lambda; E_{\lambda} = \Delta E_{\lambda} / \Delta \lambda. \quad (8.7)$$

Энергетической яркостью в данном направлении L_e ($\text{Вт} \times \text{ср}^{-1} \cdot \text{М}^{-2}$) называется отношение измеренной в этом направлении энергетической силы света к видимой площади излучающей поверхности:

$$L_e = \Delta I_{\text{с}\theta} / \Delta S_{\theta}, \quad (8.8)$$

где Θ – угол между данным направлением и нормалью к элементу излучающей поверхности.

Для диффузно излучающей поверхности величина L_e одинакова во всех направлениях и по закону Ламберта:

$$I_e = L_e s \cos \theta, \quad (8.9)$$

где s – площадь излучающей поверхности.

Спектральная плотность энергетической яркости L_{λ} ($\text{Вт} \times \text{ср}^{-1} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мкм}^{-1}$) равна:

$$L_{\lambda} = \Delta L_e / \Delta \lambda. \quad (8.10)$$

Для светового потока яркость M_{λ} ($\text{кд}\cdot\text{м}^{-2}$) определяется таким же образом, но через силу света, выраженную в канделах.

Индексы e и λ , служащие для обозначения энергетических и световых величин, используются в тех случаях, когда необходимо уточнить характер величины, в остальных случаях они могут быть опущены.

8.3. Структурная схема опико-электронного прибора

Структурная схема показывает основные узлы (блоки) устройства и связи между ними. По ней можно узнать наименования отдельных узлов, их назначение и взаимодействие. Структурная схема, содержащая узлы, наиболее типичные для многих опико-электронных устройств, называется обобщенной [56, 58].

Обобщенная структурная схема приведена на рисунке 8.13.

Основными ее частями являются: источник излучения, оптическая система, приемник лучистой энергии, усилитель (усилительно-фильтрующее устройство),



Рисунок 8.13 – Обобщенная структурная схема опико-электронного прибора

система автоматизации, регистрирующее устройство. На рисунке обозначен также объект измерения, положение которого в схеме носит условный характер.

Источник излучения создает необходимый для работы прибора лучистый поток. Выше отмечалось, что он может быть естественным или искусственным.

Оптическая система собирает необходимый для работы прибора лучистый поток, формирует изображение требуемого качества и нужную величину поля зрения. Оптическая система может содержать устройства, служащие для анализа изображения и для модуляции лучистого потока. Оптический анализатор позволяет установить определенные свойства изображения, например, распределение освещенности по полю изображения. Оптический модулятор служит обычно для периодического или импульсного изменения величины потока, достигающего чувствительной поверхности приемника излучения.

Объект измерения представляет собой какой-либо предмет или среду, о свойствах и параметрах которых необходимо получить информацию. Объектом измерения может быть и сам источник излучения. Электромагнитное излучение, взаимодействуя с объектом измерения, претерпевает изменения, несущие в себе необходимую информацию. Например, создавая поток, проникающий сквозь кювету с раствором какого-либо вещества, можно измерить степень поглощения потока и судить о концентрации раствора. В данном случае регистрируемым изменением будет уменьшение величины потока, вызванное взаимодействием его со средой, в которой он распространялся.

Опико-электронные приборы позволяют получать самую разнообразную информацию о множестве различных объектов. С их помощью собирается информация о строении и составе веществ, о положении и перемещении объекта в пространстве, а также о многих других свойствах объекта. Во всех случаях носителем информации является поток электромагнитной энергии оптического диапазона.

Приемник лучистой энергии служит для преобразования электромагнитной энергии оптического диапазона в электрическую энергию. Различают две основные группы приемников лучистой энергии: тепловые и фотоэлектрические. Последние кратко называют фотоприемниками. В тепловых приемниках энергия излучения преобразуется первоначально в тепловую, а затем в электрическую. В фотоприемниках преобразование происходит без промежуточной стадии.

Тепловые приемники обладают, как правило, чувствительностью в широком диапазоне длин волн. Фотоприемники характеризуются более высокой чувствительностью в некоторой относительно узкой спектральной области.

Имеются фотоприемники, фототок которых зависит не только от величины потока, но и от положения изображения на его светочувствительной поверхности. Такие фотоприемники называют позиционно-чувствительными.

В дальнейшем часто вместо выражений «фотоприемник» или «приемник лучистой энергии» используется слово «приемник». Усилитель увеличивает мощность полезного сигнала, действующего на его входе, и одновременно выполняет также функции амплитудно-частотного фильтра. Усилитель используется, в частности, для подавления помех, имеющих во входном воздействии. Например, если заведомо известно, что полезный электрический сигнал имеет узкий спектр, то рационально сделать усилитель узкополосным, настроенным на среднюю частоту полезного сигнала. Напряжение полезного сигнала будет усиливаться, а составляющие спектра помех, лежащие вне полосы частот усилителя, – подавляться.

Система автоматизации прибора повышает его производительность и стабильность. Автоматизация ускоряет получение результатов измерения. Часто бывает, что необходимая скорость регистрации результатов недостижима без автоматизации. С помощью системы автоматизации можно производить документирование результатов.

Введение автоматических устройств, хотя и увеличивает стоимость прибора, однако повышает производительность, что делает его экономически более выгодным по сравнению с прибором без автоматики. Степень автоматизации прибора зависит от его назначения и экономической целесообразности. Во многих случаях автоматизация обязательна.

Регистрирующие устройства предназначены для документирования результата. Распространена документация результатов на бумаге, магнитной ленте, фото- и киноплёнке.

Для визуального наблюдения результатов служат показывающие устройства: стрелочные приборы, интегральные полупроводниковые цифровые индикаторы, электронно-лучевые трубки и т. д.

8.4. Анализ устройств контроля качества поверхности цилиндрических деталей оптическим методом

Известно, что главным направлением технического прогресса на современном этапе является автоматизация технологических процессов, на основе которой можно существенно повысить производительность и качество выпускаемой продукции. Поэтому разработка и исследования устройств автоматического контроля, предназначенных для повышения надежности, производительности, улучшения условий труда в контрольных операциях, является весьма актуальной.

Оптическая схема устройства контроля качества поверхности изделий показана на рисунке 8.14.

Принцип действия данного устройства заключается в следующем [58]. Луч света от осветителя 1 фокусируется на контролируемой поверхности объективом

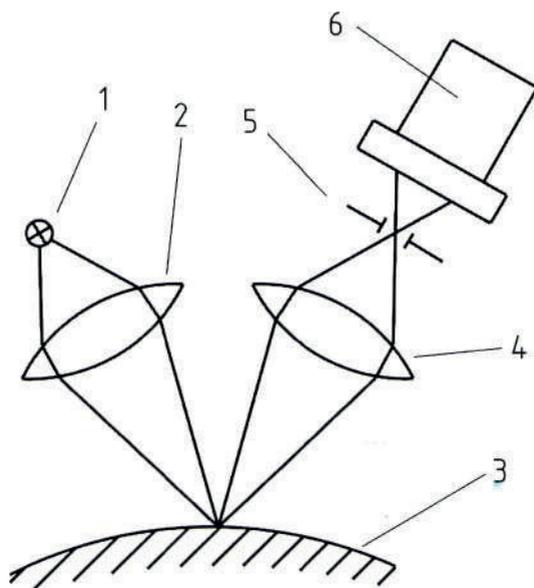


Рисунок 8.14 – Оптическая схема устройства контроля: 1 – осветитель; 2 – объектив; 3 – контролируемая поверхность; 4 – объектив; 5 – диафрагма; 6 – фотоприемник

2. Отраженный световой поток воспринимается фотоприемником 6, оптическая система которого содержит объектив 4 и диафрагму 5.

При перемещении луча по контролируемой поверхности, интенсивность отраженного светового потока изменяется из-за изменения отражающих свойств дефектного участка или рассеяния светового потока последним. В силу этого изменяется и электрический сигнал, снимаемый с фотоприемника, по величине которого можно судить о наличии дефекта на контролируемой поверхности.

В лаборатории кафедры Приборостроения КРСУ были проведены исследования возможности контроля качества латунированных поверхностей цилиндрических полых деталей сложного профиля описанным выше методом. Были получены следующие результаты:

1) с высокой достоверностью выделяются дефекты поверхности в виде трещин, вмятин забоин, темных пятен и задиров. Процент их выделяемости достигает 90 %;

2) с удовлетворительной достоверностью выявляются дефекты в виде протрав, представляющие собой участки поверхности с повышенной шероховатостью и углублениями, имеющими темный цвет. Процент выделяемости данного дефекта достигает 95%. Это связано с тем, что латунированная поверхность имеет низкий класс чистоты (высота микронеровностей достигает $5 \div 7$ мкм), и амплитуда сигнала с годных участков поверхности незначительно отличается от амплитуды сигналов с дефектных участков поверхности;

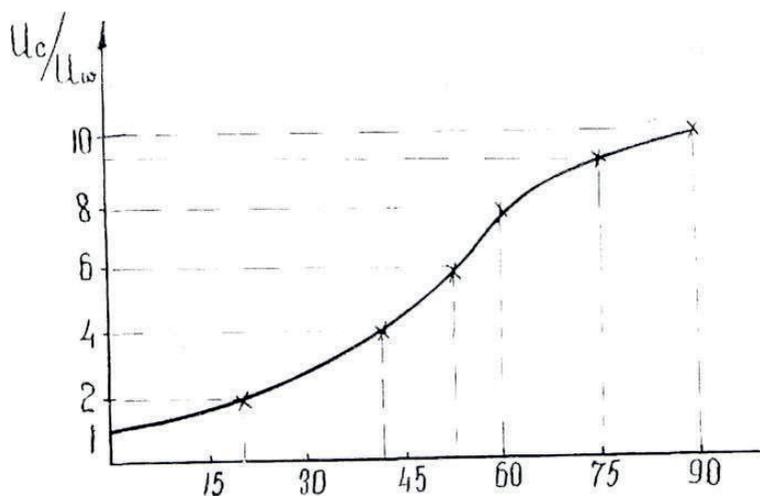


Рисунок 8.15 – Зависимость от угла пересечения траектории световой марки с направлением дефекта

3) достоверность выявления дефектов поверхности в виде кольцевых и вытянутых (направленных вдоль образующей цилиндрической поверхности) царапин зависит от угла, под которым траектория движения световой марки пересекает дефект.

В результате экспериментов было определено отношение уровня сигнала от дефекта (U_c) к уровню сигнала шума $U_{ш}$, от годной поверхности в зависимости от угла пересечения траектории движения световой марки с направлением дефекта. Эта зависимость представлена в виде графика на рисунке 8.15.

8.5. Разработка схемы излучателя и приемника

Схема излучателя показана на рисунке 8.16.

Были использованы: светодиод марки АЛ108 и резистор на 3,2 кОм. При подаче питания на контакты светодиода, он начинает излучать инфракрасное излучение, направленное под прямым углом к фотоприемнику, на контролируемую деталь. Деталь в это время вращается на валу.

Схема приемника оптического сигнала приведена на рисунке 8.17.

В данной схеме использовались следующие элементы: R1-12 кОм, R2-750 кОм, R0с-20 кОм и фотодиод ФД 256. Измерительный преобразователь был разработан на основе схемы фотодиод – операционный усилитель. Для усиления сигнала был подключен операционный усилитель КР140УД1208. Микросхема представляет собой микромощный многофункциональный операционный усилитель с регулируемым потреблением тока, с внутренней частотной коррекцией и защитой выхода от короткого замыкания. На рисунке 8.18 показан операционный усилитель.

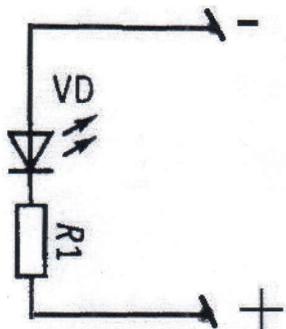


Рисунок 8.16 – Схема излучателя приемника

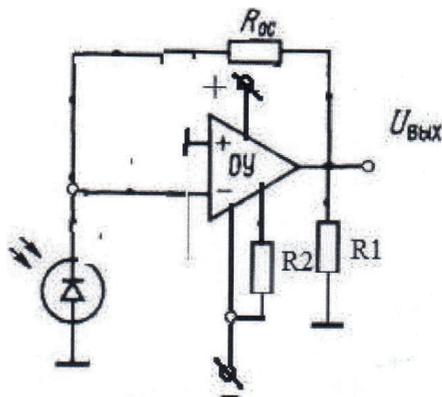


Рисунок 8.17 – Приемник оптического сигнала

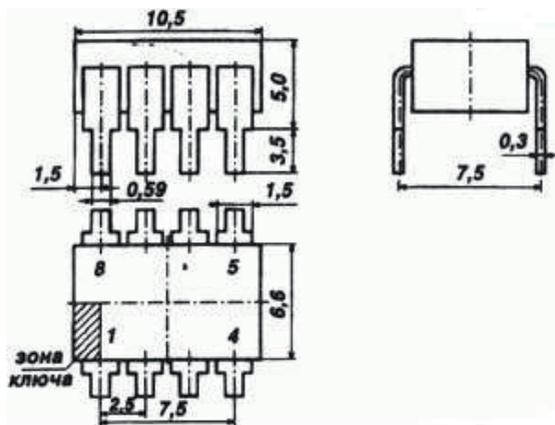


Рисунок 8.18 – Операционный усилитель

Выводы операционного усилителя: К140УД12, КР140УД1208:

- 1 – балансировка;
- 2 – вход инвертирующий;
- 3 – вход не инвертирующий;
- 4 – напряжение питания – $U_{п}$;
- 5 – выход;
- 6 – выход;
- 7 – напряжение питания + $U_{п}$;
- 8 – задающий ток.

В таблице 8.1 приведены характеристики описанного усилителя.

Таблица 8.1 – Электрические параметры операционного усилителя

№ п/п	Электрический параметр	Значение
1	Напряжение питания	± 15 В
2	Максимальное выходное напряжение при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм, $U_{\text{вх}} = \pm 0,1$ В	Не менее ± 10 В
3	Напряжение смещения нуля при $U_{\text{н}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм	Не более ± 6 мВ
4	Входной ток: при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм, $I_{\text{д}} = 1,5$ мкА; при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм, $I_{\text{д}} = 15$ мкА	Не более 30 мкА; не более 190 мкА
5	Разность входных токов при $U_{\text{н}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм	Не более 6 нА
6	Ток потребления: при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм, $I_{\text{д}} = 1,5$ мкА; при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм, $I_{\text{д}} = 15$ мкА	Не более 30 мкА; не более 190 мкА
7	Коэффициент усиления напряжения: при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм; при $U_{\text{п}} = \pm 3$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм	Не менее 50000; не менее 25000
8	Максимальная скорость нарастания выходного напряжения: при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $I_{\text{д}} = 1,5$ мкА, $R_{\text{н}} = 75$ кОм; при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $I_{\text{д}} = 15$ мкА, $R_{\text{н}} = 5$ кОм	Не менее 0,01 В/мкс; не менее 0,1 В/мкс
9	Коэффициент ослабления синфазных входных напряжений при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $R_{\text{н}} = 75$ кОм	Не менее 70 дБ
10	Средний температурный дрейф напряжения смещения: при $U_{\text{п}} = \pm 15$ В, $I_{\text{д}} = 1,5$ мкА; при $U_{\text{п}} = \pm 3$ В, $I_{\text{д}} = 15$ мкА	7 мкВ/°С; 3 мкВ/°С

Предельно допустимые режимы эксплуатации

1	Напряжение питания	$\pm(3...16,5)$ В
2	Входное синфазное напряжение	Не более ± 10 В
3	Входное дифференциальное напряжение	± 20 В
4	Сопротивление нагрузки	Не менее 5 кОм
5	Емкость нагрузки	Не более 100 пФ
6	Температура окружающей среды	$-60...+85$ °С

На рисунке 8.19 приведена фотография операционного усилителя. В технике измерения малых токов источников был использован принцип измерения падения напряжения на образцовом сопротивлении, связанной отрицательной обратной связью по напряжению. При этом к усилителю предъявляются требования наличия высокого входного сопротивления и большого коэффициента усиления при малых уровнях шумов. Использование во входном каскаде ОУ полевых транзисторов обеспечивает низкие значения шумовых входных токов, ЭДС и токов смещения усилителя. ЭДС смещения усилителя в рабочем диапазоне температур также оказывается меньшей из-за дифференциальной схемы входного каскада.



Рисунок 8.19 –Операционный усилитель

При этом фотодиод работает как генератор тока, а ОУ служит преобразователем этого тока в напряжение. R1 подключена для нагрузки, а R2 программирует микросхему по микротоку.

Механическая часть включает электродвигатель, закрепленный в вертикальном положении, на валу которого есть посадочное место для контролируемой детали.

Во время измерения диаметрального размера вала было обнаружено его биение, которое было замерено с помощью миниметра. Для измерения биения вала прибор устанавливался на жестком основании. Поворачивая ротор вручную, производилась запись показаний индикатора. Для более легкого поворота ротора шейка вала смазывалась маслом.

Биевание вала составило 0,06 мм при допустимом 0,04 мм. Это вносит большую погрешность и приводит к необходимости доработки механической части.

Анализ полученных данных

Экспериментальные данные разработанной системы показаны в таблице 8.2.

Таблица 8.2 – Результаты эксперимента разработанной системы

Наименование дефекта	Глубина дефекта	Показатели сигнала
Трещина	0,8 мм	100 мВ
Тонкая царапина	0,1 мм	60 мВ
Забоина	0,5 мм	80 мВ
Шероховатость	0,1 мм	40 мВ

На рисунке 8.20 показан процесс измерения дефекта изделия

Во время процесса выявления дефектов в контролируемых деталях было обнаружено влияние погрешности, вызванной радиальным биением вала на результат измерения. Биение вала обусловлено механической частью устройства.

При проведении эксперимента в качестве фотоприемника был применен фотодиод ФД 24-К, в качестве осветителя – оптический квантовый генератор ЛГ-56,

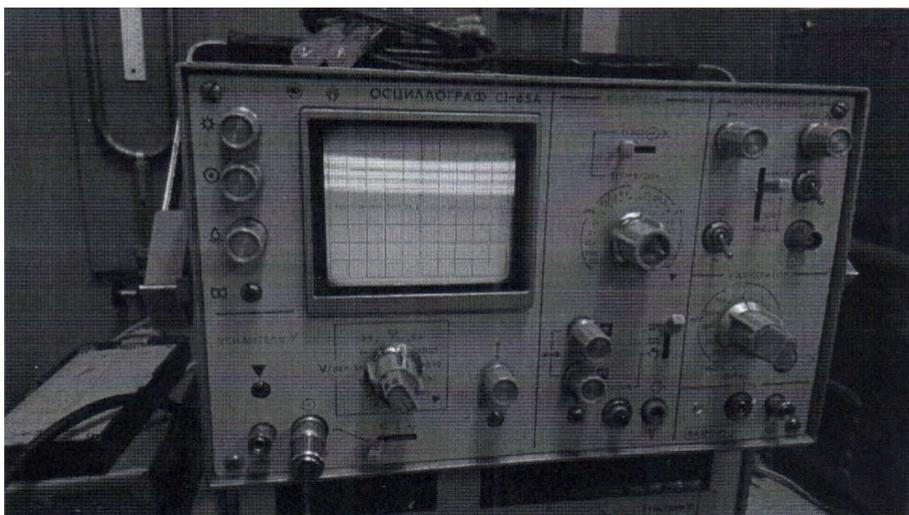


Рисунок 8.20 – Прибор для измерения величины биения вала

скорость луча по поверхности 1,25 м/сек. Исследования проводились на дефекте в виде царапины шириной 0,5 мм и глубиной 0,027 мм.

Ниже приводится краткий анализ устройств контроля, экспериментально проведенных в лаборатории, отличающихся друг от друга оптическими схемами, количеством фотоприемников и осветителей с точки зрения их способности выявлять различные виды дефектов поверхности.

Для упрощения анализа дефекты были подразделены на три вида:

а) точечные дефекты поверхности. Выявление их не зависит от направления траектории движения световой марки по поверхности изделия;

б) кольцевые дефекты в виде замкнутой царапины вдоль окружности цилиндрической поверхности;

в) вытянутые дефекты – царапины, направление которых совпадает с направлением образующей цилиндрической поверхности.

Цель анализа – выбор наиболее оптимальных схем для создания высокопроизводительных устройств автоматического контроля качества поверхностей цилиндрических деталей массового производства.

8.6. Разработка принципиальных схем устройства контроля качества поверхности деталей

1. Устройство контроля качества поверхности деталей [56] с одним осветителем и набором фотоприемников.

Устройство контроля представлено на рисунке 8.21. Оно состоит из осветителя 1, световой поток которого преобразуется цилиндрической линзой 2 в луч прямоугольного сечения, освещающий часть поверхности цилиндрической детали 3 вдоль ее образующей. Отраженный от поверхности световой поток направлен

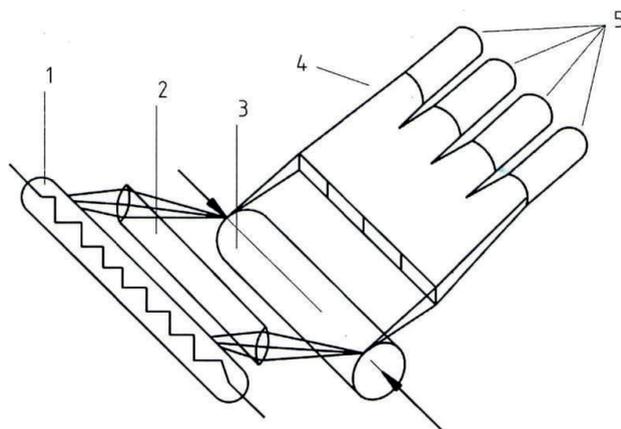


Рисунок 8.21 – Схема устройства контроля с одним осветителем и набором фотоприемников: 1 – осветитель; 2 – цилиндрическая линза; 3 – контролируемое изделие; 4 – волоконный световод; 5 – фотоприемник

на торец волоконного световода 4, делящего его на «n» участков. Выходные торцы световода присоединены к фотоприемникам 5. Таким образом, освещенный участок поверхности детали делится соответственно на «n» участков, каждый из которых контролируется отдельным фотоприемником. Количество фотоприемников определяет разрешающую способность устройства, характеризующую размеры уверенно выделяемых дефектных участков поверхности. С увеличением количества фотоприемников разрешающая способность устройства возрастает. Снимаемое с фотоприемников напряжение усиливается и подается на амплитудный дискриминатор или на какое-либо другое устройство обработки электрического сигнала, причем каждый из фотоприемников должен иметь индивидуальный канал усиления и обработки электрического сигнала.

К достоинствам устройства можно отнести относительно малое время контроля, так как вся поверхность детали контролируется за один ее оборот, сравнительную простоту юстировки оптической системы, которая сводится к фокусировке и установке вдоль образующей детали светового луча и установке приемного торца световода относительно участка освещаемой поверхности.

К недостаткам устройства можно отнести сравнительно большую сложность блока обработки электрических сигналов в связи с большим числом каналов усиления, а, следовательно, и трудность его настройки и относительно большие габариты устройства.

В устройстве (см. патент № 34067, Япония) количество каналов усиления и обработки электрических сигналов снижено вдвое за счет попарного включения фотоприемников в мостовую схему, но это понижает вероятность выявления мелких дефектов поверхности.

Основным недостатком устройства является невозможность обнаружения кольцевых дефектов, так как их ширина и глубина малы, что приводит

к незначительному изменению интенсивности отраженного светового потока, а их замкнутость исключает модуляцию светового потока.

2. На рисунке 8.22 показана схема устройства контроля, в котором в отличие от описанного выше, волоконный световод исключен, а фотоприемники расположены в непосредственной близости от контролируемой поверхности. Такая оптическая схема позволяет несколько уменьшить габариты устройства и его стоимость.

Однако разрешающая способность устройства, зависящая от количества фотоприемников, несколько снижена из-за относительно больших размеров последних. Кроме того, значительно усложняется юстировка оптической системы из-за разброса оптических параметров фотоприемников. Вследствие этого последние должны иметь регулировочные перемещения.

3. Устройство контроля с набором осветителей и фотоприемников.

На рисунке 8.23 показана схема устройства контроля, в котором, в отличие от предыдущего, осветитель с формирующей оптикой заменен набором точечных осветителей, расположенных в ряд вдоль образующей цилиндрической детали. Отраженный от поверхности световой поток направлен на фотодиоды, которые расположены так же, как и осветители. Данное устройство контроля имеет значительно меньшие габариты по сравнению с описанными выше устройствами. Это позволяет использовать его для контроля качества внутренних поверхностей цилиндрических деталей сравнительно малых диаметров.

К достоинствам этого устройства можно отнести отсутствие жесткой оптики и волоконных световодов.

К недостаткам – возросшую сложность осветительного узла, необходимость юстировки, как фотоприемников, так и осветителей, невозможность контроля кольцевых дефектов, по вышеуказанным причинам.

4. Устройство контроля с одним осветителем и фотоприемником.

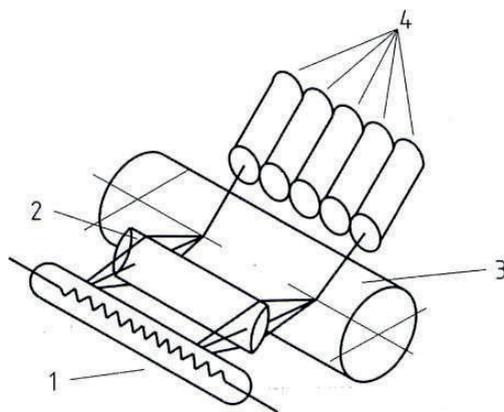


Рисунок 8.22 – Схема устройства контроля с одним осветителем и набором фотоприемников: 1 – осветитель; 2 – цилиндрическая линза; 3 – контролируемое изделие; 4 – фотоприемники

В устройстве контроля, схема которого приведена на рисунке 8.24, луч света отосветителя 1 фокусируется объективом 2, и при помощи оптико-механического дефлектора 3 сканируется вдоль образующей цилиндрической поверхности 4. Отраженный от поверхности световой поток через волоконный световод 5 направлен на фотокатод фотоприемника 6.

При сканировании луча вдоль образующей цилиндрической поверхности интенсивность отраженного светового потока изменяется в зависимости от качества поверхности, тем самым модулируя по амплитуде напряжение, снимаемое с фотоприемника.

При этом возможны два варианта контроля.

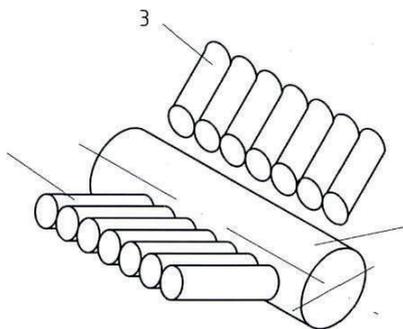


Рисунок 8.23 – Схема устройства контроля с набором осветителей и набором фотоприемников

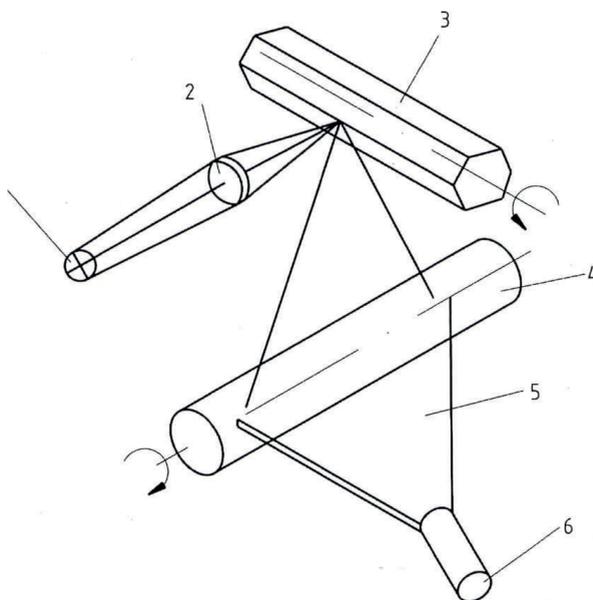


Рисунок 8.24 – Схема устройства контроля с одним осветителем и фотоприемником: 1 – осветитель; 2 – объектив; 3 – дефлектор; 4 – контролируемая деталь; 5 – световод; 6 – фотоприемник

При первом варианте контролируемая деталь вращается вокруг световой оси с относительно большой скоростью, а луч света перемещается вдоль поверхности со сравнительно низкой скоростью.

В этом случае осуществляется спиральная развертка контролируемой поверхности, и выявляются точечные дефекты и продольные царапины, так как световой луч пересекает последние под большим углом.

Во втором варианте контроля деталь вращается вокруг своей оси с относительно медленной скоростью, а луч света движется по поверхности с большой скоростью. В этом случае осуществляется построчная развертка поверхности детали, где направление строк совпадает с направлением образующей цилиндрической поверхности или они пересекаются под небольшим углом. В этом случае выявляются точечные и кольцевые дефекты.

Время контроля при этом зависит от числа оборотов барабана оптико-механического дефлектора и от числа его зеркальных граней, а также от диаметра контролируемой детали.

Нетрудно видеть, что данное устройство позволяет контролировать продольные и кольцевые дефекты без принципиальных изменений конструкции устройства, что нельзя сказать о предыдущих устройствах.

К достоинствам этого устройства можно отнести наличие одного фотоприемника, что в свою очередь намного упрощает конструкцию блока обработки электрического сигнала и облегчает его наладку и обслуживание.

К недостаткам устройства можно отнести относительно большие габариты, наличие оптико-механического дефлектора, требующего жесткие допуски на точность изготовления, относительную сложность юстировки оптической системы устройства.

5. Устройство контроля с набором осветителей и одним фотоприемником.

На рисунке 8.25 представлена схема устройства контроля качества поверхности, в котором, в отличие от предыдущего устройства, оптико-механический дефлектор заменен набором точечных осветителей, расположенных в ряд вдоль образующей цилиндрической поверхности детали, которые в процессе контроля поочередно переключаются при помощи коммутатора.

Разрешающая способность устройства зависит от диаметра освещенного участка точечным осветителем, что в свою очередь определяет число осветителей. Данное устройство, как и предыдущее, позволяет производить контроль двумя вариантами.

При первом варианте контроля частота переключения осветителей равна частоте вращения детали. В этом случае в течение одного оборота детали контролируется часть поверхности, освещаемая одним осветителем, в течение следующего оборота контролируется часть поверхности, освещаемая следующим осветителем и так далее. Следовательно, деталь проконтролируется за K оборотов, где K – количество точечных осветителей. В данном случае выявляются точечные дефекты и продольные царапины.

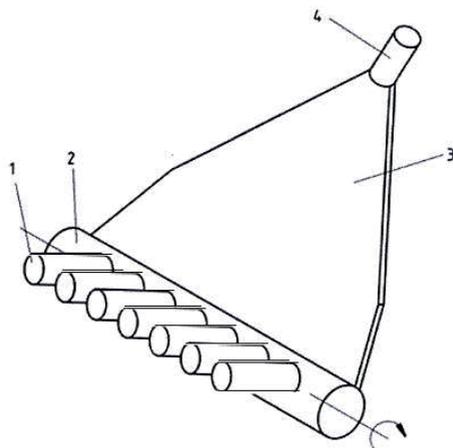


Рисунок 8.25 – Схема устройства контроля с набором осветителей и одним фотоприемником: 1 – осветитель, 2 – деталь, 3 – световод, 4 – фотоприемник

При втором варианте контроля частота переключения осветителей намного выше частоты вращения детали. В этом случае поочередно освещаются участки вдоль образующей цилиндрической поверхности.

В этом случае вся деталь контролируется за один оборот, и выявляются точечные и кольцевые дефекты.

К достоинствам устройства можно отнести малые габариты, относительную простоту осветительного узла, наличие одного фотоприемника и, следовательно, возможность выявления как кольцевых, так и вытянутых царапин.

К недостаткам можно отнести наличие дополнительного электронного блока, управляющего переключением осветителей, необходимость осветителей по параметрам, необходимость юстировки каждого осветителя в отдельности.

Анализ работы устройств контроля качества поверхности цилиндрических деталей позволил сделать следующие выводы:

1) устройства контроля, имеющие в своем составе набор фотоприемников, обеспечивают большое быстродействие, но не выявляют кольцевые царапины. Блок обработки электрических сигналов сложен, так как число каналов усиления и обработки электрических сигналов равно количеству фотоприемников, а это усложняет наладку и эксплуатацию устройства, снижает его надежность;

2) устройства контроля, имеющие в своем составе один фотоприемник по быстродействию, уступают устройствам контроля с набором фотоприемников и имеют более сложный осветительный узел. Блок обработки электрических сигналов имеет всего один канал усиления и обработки, и поэтому более прост в обслуживании.

Основным достоинством этих устройств является возможность обслуживания как кольцевых, так и вытянутых царапин. Для этого необходимо изменять скорость движения луча по поверхности детали при неизменной частоте вращения последней, что практически легко осуществляется.

управления поступают импульсы от генератора тактовых импульсов 1, а также импульсы от устройства синхронизации, состоящего из светодиода 5, диска с отверстием 6 и фотоприемника 7, установленного на оси ведомого конуса.

После установки детали на позицию контроля, последняя приводится во вращение при помощи конусов. Первый же импульс от устройства синхронизации запускает устройство переключения осветителей. Начиная со второго импульса синхронизации, включается первый светодиод. Переключение светодиодов происходит при каждом последующем импульсе синхронизации. В этом случае частота переключения светодиодов равна частоте вращения и в течение одного оборота контролируется участок поверхности, освещаемый одним светодиодом.

Импульсы синхронизации подсчитываются счётчиком устройства управления, коэффициент пересчета которого равен количеству светодиодов. При заполнении счетчика вырабатывается импульс, переводящий управление устройством переключения от генератора тактовых импульсов. В этом случае частота переключения светодиодов намного выше частоты вращения детали. Тем самым осуществляется строчная развертка поверхности в течение полного оборота детали, по завершении которого импульс устройства синхронизации приводит схему управления устройством переключения в исходное состояние.

Следующий цикл контроля начнется только после выгрузки детали и установки на позицию контроля следующей.

Время контроля устройства в основном зависит от скорости вращения детали. В данном случае скорость вращения детали была выбрана равной $n = 3000$ об/мин, т. е. 50 об/сек.

Количество светодиодов и линий зависит от их размеров и от длины l контролируемой детали. В данном случае были выбраны светодиоды Ал108А с размерами $4 \times 2,5 \times 12,5$ мм. Длина контролируемой детали 67 мм. Необходимое число диодов K :

$$\dot{E} = 67 / 2,5 = 26,8 = 27 \text{ шт.}$$

Время контроля при частоте переключения светодиодов равной частоте вращения детали:

$$t_1 = \frac{1}{50} K = 27/50 = 0,54 \text{ с.}$$

Время контроля при строчной развертке равно времени одного полного оборота детали:

$$t_2 = \frac{1}{n} = \frac{1}{50} = 0,02 \text{ с.}$$

Общее время контроля:

$$t = t_1 + t_2 = 0,54 + 0,02 = 0,56 \text{ с.}$$

Частота переключения светодиодов зависит от диаметра детали и от принятого числа строк развертки поверхности детали. В данном случае принято:

ширина строки $n_{\text{стр}} = 1$ мм,
при диаметре детали $d = 14,5$ мм.

Число строк:

$$m = \frac{\pi d}{n_{\text{стр}}} = \frac{14,5 * 3,14}{1} = 45,5.$$

Примем $m = 46$.

Частота переключения светодиодов:

$$f = \frac{km}{t_2} = \frac{46 * 27}{0.02} = 62100 \text{ Гц.}$$

В то время как допуская частота переключения равна:

$$f = \frac{1}{t_{\text{ос}} + t_{\text{н}}} = \frac{1}{(2,4 + 2) * 10^{-6}} = 227272 \text{ Гц,}$$

где $t_{\text{ос}}$ – время нарастания светового импульса; $t_{\text{н}}$ – время спада светового импульса.

В данном случае соблюдается условие:

$$W / W_0.$$

Описанное выше устройство контроля было изготовлено и испытано под руководством профессора, д.т.н. А.П. Муслимова и показало удовлетворительные результаты.

В таблице 8.3 приведены экспериментальные данные чувствительности разработанной системы к различным типам поверхности дефектов.

В заключение следует отметить простоту устройства контроля, однако необходима доработка электронной системы формирования сигнала. Для этого необходимо провести статистический анализ дефектов поверхностей изделия с целью выбора оптимальных критериев для формирования необходимых сигналов от дефектов.

Результаты исследований подтвердили перспективность использования оптико-электронных приборов для автоматического контроля рельефных поверхностных дефектов изделий типа тел вращения, что позволяет с высокой производительностью объективно осуществлять данную технологическую операцию. Разработанная обобщенная структура оптико-электронного прибора позволяет целенаправленно произвести выбор элементов в зависимости от конкретной производственной задачи. Подтверждена возможность применения для автоматического контроля различных рельефных дефектов изделий типа тел вращения.

Таблица 8.3 – Экспериментальные данные чувствительности разработанной системы

Наименование дефекта	Размерная характеристика			Состояние сигнал-шум (отн. ед.)
	длина	ширина	глубина	
Трещины. Сквозное нарушение целостности металла	6 мм	0,8 мм		2,3
	5 мм	0,5 мм	-	2
	5 мм	0,2 мм		2,5
Отклонение цвета поверхности	3 мм	4 мм	-	2
Царапины в виде тонких продольных полосок	0,5 мм	0,5	0,1	1,9
	2,5 мм	0,5	0,1	
Отпечатки нарушения частоты поверхности	Площадью		Высота	
	1 м ²		0,2	2,5
	3 м ²		0,4	2,4
Забоины в результате воздействия твердым предметом	Площадью			
	1 м ²		0,5	1,6
	3 м ²		0,5	2
Оголение	Площадью	На толщину покрытия		2
	1 м ²			1,6
	3 м ²			
Глубокие надрывы на поверхности детали торцу	2 мм	2 мм		1,6

8.7. Исследование преотражения излучения в элементах поверхности. Основные положения

Для разработки математической модели, описывающей формирование пространственно-временных характеристик отраженного лазерного сигнала на участках с дефектами поверхностного слоя в зависимости от вида повреждений, следует ввести безразмерные параметры процесса измерений при выявлении поверхностных повреждений, которые позволяют установить энергетическое соответствие зондирующих сигналов геометрическим параметрам поверхностных дефектов, и однозначно установить характер повреждений, а также сканировать поверхности при двух различных углах падения излучения.

Оценка поверхностных повреждений

Ограниченные возможности традиционных механических и оптических методов оценки поверхностных повреждений (невозможность проведения исследования в условиях эксплуатации без остановки оборудования и разборки изделий, низкая чувствительность измерений, сложность определения вида повреждения и др.), а также случайный характер распределения самих повреждений и их параметров (глубины, угла раскрытия и расположения плоскости симметрии трещины, одновременное наличие различных видов повреждений и др.), требуют

создания новых способов и испытательного оборудования для обнаружения дефектов поверхности.

Преимуществами приборов, принцип действия которых основан на использовании в качестве излучателя светодиодов, являются бесконтактность, высокая информативность, быстрое действие, возможность работы в реальном масштабе времени. Подобные измерительные приборы имеют существенное превосходство перед другими средствами контроля состояния поверхностей деталей и применяются для обнаружения поверхностных трещин, дефектов сварных швов и резьб, определения шероховатости и износа поверхности. Существующие оптические системы дефектоскопии поверхностного слоя изделий предназначены, в основном, для выявления трещин и забоин. Наличие повреждений такого рода определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного света или диффузно рассеянного трещиной. Возможно одновременное измерение этих двух составляющих.

Существуют оптические схемы, в которых одновременно регистрируются интенсивность зеркально отраженного и диффузно рассеянного излучения [6]. Измерение этих двух составляющих позволяет учитывать влияние флуктуаций интенсивности источника излучения и изменения состояния поверхности в пределах одной детали.

Оптимальным вариантом является оптическая дефектоскопическая система, в которой наличие повреждений определяется по изменению интенсивности зеркально отраженного излучения, размеры дефекта определяются разницей координат, соответствующих изменению величины сигнала. При измерении диффузно рассеянной составляющей излучение попадает на детектор только при наличии повреждений, в этом случае отсутствует возможность непрерывного контроля состояния поверхности – шероховатости, наличия рассеивающих частиц, окисной пленки на поверхности и др. Использование дополнительного фотоприемника для формирования опорного сигнала позволяет учитывать флуктуации интенсивности источника излучения. Определение повреждений целесообразно проводить по изменению относительной величины сигнала W / W_0 , где W_0 – среднее значение сигнала для поверхности исследуемого изделия. В этом случае нет необходимости регулировать величину светового потока в зависимости от материала детали, и падающего на исследуемую поверхность. Введение безразмерных параметров, определяемых по зависимости изменения относительной величины сигнала W / W_0 от безразмерной координаты x / x_0 (x_0 – шаг сканирования по поверхности), позволяет определить наличие повреждений и их характер (царапина, трещина, увеличение шероховатости поверхности в результате абразивного износа, наличие окисленного слоя или одновременное наличие двух видов повреждений).

Переотражение излучения в трещине

При построении математической модели изменения характеристик отраженного сигнала на участках поверхности с наличием повреждений, примем следующие допущения: все изменения интенсивности и направления распространения излучения происходят в плоскости падения излучения (плоская задача). Источник излучения – равномерно распределенный; бездефектная поверхность трещины является зеркально отражающей; коэффициент отражения принят постоянным по поверхности и не зависящим от температуры; дифракционные явления на поверхности не учитываются.

Поскольку наличие дефектов в виде трещин, царапин и забоин приводит, в первую очередь, к изменению направления распространения отраженного от поверхности излучения или его переотражению на данном элементе поверхности, то для выявления основных закономерностей допустимо считать поверхность зеркально отражающей. Изменение шероховатости и наличие рассеивающих частиц приводит к изменению соотношения сигнал/шум и не оказывает влияния на интенсивность и направление распространения переотраженного излучения. Допущения о сведении задачи к плоскому случаю, равенстве размеров источника излучения и приемного объектива, и описание формы повреждений простейшими геометрическими фигурами, упрощают рассматриваемую задачу, и при этом позволяют выявить основные закономерности рассматриваемых явлений.

Ранее были рассмотрены некоторые закономерности переотражения излучения в трещине треугольного сечения, а также были определены: зависимости изменения направления распространения излучения и ширины пучка на выходе из трещины, величины отраженного сигнала для случая совпадения направления излучения на выходе из трещины с направлением зеркально отраженного от бездефектной поверхности излучения, условия попадания излучения на приемный объектив при незначительном увеличении или уменьшении угла раскрытия трещины.

Рассмотрим основные закономерности изменения направления и интенсивности переотраженного излучения в трещине с произвольным углом раскрытия, и определим основные безразмерные параметры процесса измерений.

Угол между вертикалью и направлением распространения излучения на выходе из трещины (рисунок 8.27):

$$\beta_n = \pi - \alpha - 2n\gamma, \quad (8.12)$$

где α – угол падения излучения на исходную поверхность; γ – половина угла раскрытия трещины, n – число переотражений излучения.

Из треугольника ABC следует:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \varphi_1 + \frac{\pi}{2} + \varphi_2 + 2\gamma = \pi,$$

$$\varphi_2 = -2\gamma + \varphi_1 = -\alpha - 3\gamma + \frac{\pi}{2}; \beta_2 = \frac{\pi}{2} - \varphi_2 = \pi - \alpha - 4\gamma,$$

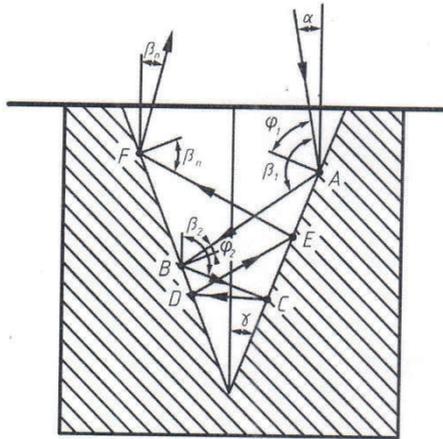


Рисунок 8.27 – Схема распространения излучения точечного источника в трещине: $\varphi_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha - \gamma$; $\beta_1 = 2\varphi_1 + \alpha = \pi - \alpha - 2\gamma$.

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha - (2n - 1)\gamma, \quad (8.13)$$

где φ_1 – угол падения излучения на поверхность трещины; β_1 – угол между отраженным поверхностью трещины излучением и вертикалью при первом отражении; φ_2, β_2 – угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при втором отражении от поверхности трещины; φ_n, β_n – угол падения излучения и угол между отраженным лучом и вертикалью при выходе из трещины; γ – половина угла раскрытия трещины, n – число переотражений излучения.

Отметим, что после отражения от поверхности трещины излучение идет вниз, если $\varphi_n > 0$, вверх, если $\varphi_n < 0$.

Соотношение углов α и γ , для которых направление распространения излучения на выходе из трещины соответствует направлению зеркально отраженного от исходной поверхности излучения, и определяется в случае:

$$\beta_n = \alpha, \quad \gamma = \frac{\frac{\pi}{2} - \alpha}{n}.$$

При падении излучения источника с квадратным сечением с равномерным распределением мощности на поверхность с трещиной, когда приемный объектив также имеет квадратное сечение со стороной B_2 и расположен под углом β к нормали к поверхности, значение x (смещение светового пятна относительно края трещины), при котором излучение, выходящее из трещины, попадает на приемный объектив, удовлетворяет неравенству:

$$H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha, \quad (8.14)$$

где H_2 , B_1 – глубина трещины.

Момент, при котором отраженное трещиной излучение начинает попадать на объектив, соответствует $x_1 = x$, тогда максимальное значение отраженного трещиной излучения попадает на приемный объектив при $x = 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$.

Затем значение этой величины снижается и становится равным нулю, при $x = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_2 / \cos \alpha$.

Отношение величины сигнала W при наличии трещины к величине сигнала на бездефектной поверхности W_0 , при $n = 2$ для $H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < 2H_2 \operatorname{tg} \gamma$, определяется выражением:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x - x_1)}{A_1 B_1 / \cos \alpha}, \quad (8.15)$$

а для $H_2 \operatorname{tg} \gamma < x < H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / \cos \alpha$:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{x - 2H_2 \operatorname{tg} \alpha}{B_1 / \cos \alpha} + \frac{A_2^2 (x - (x - B_1 / \cos \alpha))}{A_1 B_1 / \cos \alpha}, \quad (8.16)$$

где A_2 – коэффициент отражения поверхности трещины; A_1 – коэффициент отражения бездефектной поверхности.

При этом доля излучения, попавшего на объектив после переотражения в трещине для соотношения углов $\gamma = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) / n$, не зависит от высоты распо-

ложения объектива над поверхностью H_1 . Аналогичная картина распространения излучения в трещине будет наблюдаться при всех четных значениях n и при неизменном значении ширины трещины. Условие $\beta_n = \alpha$ также выполняется при уменьшении угла раскрытия трещины. Координаты x_1 и x_2 имеют те же значения, что и для $n = 2$, угол выхода излучения из трещины β_n при $n = 2$. Значения W / W_0 определяются в соответствии с выражениями (8.15) и (8.16), во второе слагаемое A_2^2 входит A_2^n . При уменьшении угла раскрытия трещины данное условие выполняется при $n = 2$ и увеличении углов α и β_n . Для нечетных значений n излучение выходит из трещины в направлении источника.

Рассмотрим случай, когда половина угла раскрытия трещины увеличивается на $\Delta \gamma$ (рисунок 8.28), и определим характеристику пучка, выходящего после переотражения из трещины при прежнем значении угла падения излучения $\alpha = 30^\circ$ и глубины трещины ($H_2 = B_1$).

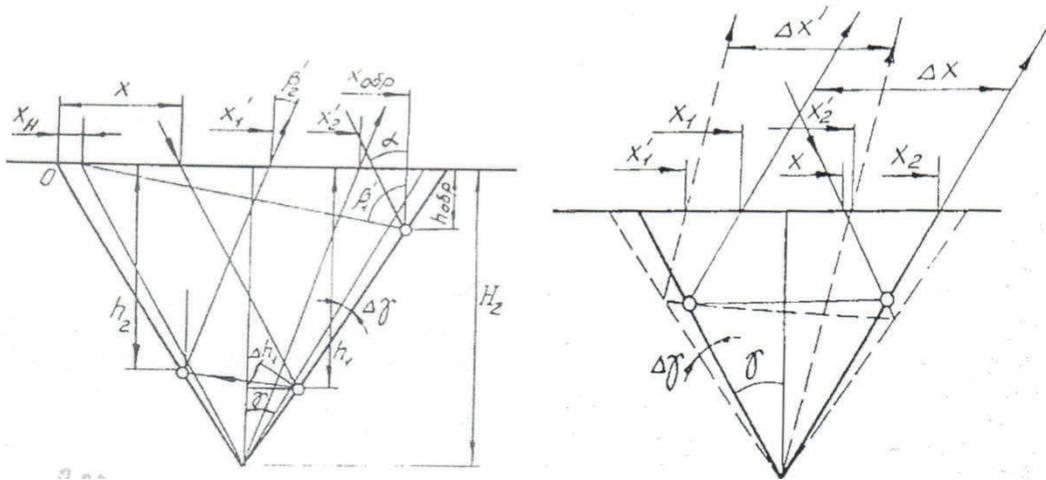


Рисунок 8.28 – Распространение излучения в трещине при увеличении угла раскрытия трещины на $2\Delta\gamma$ (α) и распространение излучения в трещинах с углами: $2\gamma \text{ и } 2(\gamma + \Delta\gamma)$ (β)

В соответствии с условием (8.13), излучение выходит под углом $\beta'_2 = \beta_2 - 4\Delta\gamma$, $\beta'_1 = \beta_1 - 2\Delta\gamma$, $\beta_1 = \frac{\pi}{2} - 2\Delta\gamma$, а ширина выходящих из трещины

пучков $\Delta x = x_2 - x_1$, $\Delta x' = x'_2 - x'_1$. Здесь знак «'» соответствует трещине с углом $\gamma + \Delta\gamma$. Если трещины с углом γ , то все излучение, попадающее в трещину, выходит из нее под углом β_2 , то для трещины с углом $\gamma + \Delta\gamma$ под углом $\beta'_2 = \beta_2 - 4\Delta\gamma$ распространяется излучение, попадающее в трещину при $x_{\text{зад}} < x < x$ и имеют следующие параметры: $x_n = H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma) - \text{tg}\gamma$,

$S = 2H_2 \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma)$, $S / B_1 = 2\text{tg}(\gamma + \Delta\gamma)$. В частности, при $\Delta\gamma = 3^\circ$, $S / B_1 = 1.3$

Определим значение $x_{\text{зад}}$ – координатные изменения направления сигнала:

$$x_{\text{зад}} + h_{\text{зад}} \text{tg}\alpha + h_{\text{зад}} \text{tg}(\gamma + \Delta\gamma) = 2H_2 (\text{tg}(\gamma + \Delta\gamma));$$

$$h_{\text{зад}} = (x_{\text{зад}} + h_{\text{зад}} \text{tg}\alpha) \text{ctg}\beta_1. \quad (8.17)$$

Тогда момент, когда излучение, выходящее из трещины, начинает попадать на приемный объектив, определится условием:

$$D'_1 < 0, D'_1 = x'_1 - x - (\text{tg}\alpha - \text{tg}\beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha),$$

$$x'_1 - x < (\text{tg}\alpha - \text{tg}\beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha). \quad (8.18)$$

Излучение, выходящее из трещины, полностью попадает на приемный объектив при условии:

$$\begin{aligned}
D_2' < 0, D_1'' > 0, \quad D_1'' = x_1' - x + \frac{B_1}{\cos \alpha} - (tg \alpha - tg \beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha), \\
x_1' - \left(x + \frac{B_1}{\cos \alpha}\right) < (tg \alpha - tg \beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha), \\
D_2' = x_2' - x - (tg \alpha - tg \beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha), \\
x_1' - x < (tg \alpha - tg \beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha). \tag{8.19}
\end{aligned}$$

Излучение выйдет за границы приемного объектива при условии:

$$\begin{aligned}
D_2' < 0, \quad D_2' = x_2' - x + \frac{B_1}{\cos \alpha} - (tg \alpha - tg \beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha), \\
x_2' - \left(x - \frac{B_1}{\cos \alpha}\right) < (tg \alpha - tg \beta_2)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha). \tag{8.20}
\end{aligned}$$

Соотношения (8.14), (8.15), (8.17), (8.20) позволяют построить зависимости изменения относительной величины сигнала W / W_0 .

Ширина пучков и направление их распространения, условия попадания излучения на приемный объектив зависят от соотношения углов α и γ были определены ранее (8.16).

Так как в этом случае $\beta_n \neq \alpha$, то величина полученного сигнала зависит от высоты расположения приемного объектива над поверхностью.

Зависимость изменения относительной величины сигнала от координаты определяется соотношением:

$$\frac{W}{W_0} = \frac{W_1}{W_0} + \frac{W_2}{W_0}. \tag{8.21}$$

Величина отраженного сигнала состоит из двух слагаемых: первое – интенсивность излучения, отраженного от бездефектной поверхности, второе – интенсивность излучения, переотраженного трещиной. Соотношение величин W_1 и W_2

определяется отношением диаметра пятна излучения на поверхности и шириной трещины и определяет вероятность обнаружения поверхностного дефекта.

Величина W_2 / W_0 определяется геометрией повреждения и параметрами оптической системы – углом падения излучения на поверхность, углом установки приемного объектива и высотой расположения приемного объектива над поверхностью.

В зависимости от значения координаты x величины W_1 / W_0 и W_2 / W_0 принимают следующие значения:

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{B_1 / \cos \alpha - x}{B_1 \cos \alpha} \text{ при } x < 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \quad (8.22)$$

$$\frac{W_1}{W_0} = \frac{x - 2H_2(\gamma + \Delta\gamma)}{B_1 / \cos \alpha} \text{ при } x > 2H_2 \operatorname{tg}(\gamma + \Delta\gamma), \quad (8.23)$$

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{(x_{i\dot{\alpha}\delta} - (x - B_1) / \cos \alpha) (x_2' - x_1' + \Delta_1')}{B_1 / \cos \alpha (x_2' - x_1')} \text{ при } \Delta_1' \langle 0, \Delta_1'' \rangle 0, \quad (8.24)$$

$$\frac{W_2}{W_0} = A^{n-1} \frac{(x - x_n) - \Delta_1'}{B_1 / \cos \alpha (x_2' - x_1')} \text{ при } \Delta_1'' \langle 0, \Delta_2'' \rangle 0. \quad (8.25)$$

Значения координат изменения направления распространения излучения x_i и $x_{i\dot{\alpha}\delta}$ были определены ранее (8.21). Величины Δ_1' , Δ_1'' , Δ_2'' определяются из условия попадания излучений на приемный объектив:

$$\Delta_1' = x_1' - x - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_n)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha), \quad (8.26)$$

$$\Delta_1'' = x_1' - x + B_1 / \cos \alpha - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_n)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha), \quad (8.27)$$

$$\Delta_2'' = x_2' - x + B_1 / \cos \alpha - (\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta_n)(H_1 - 0.5B_1 \sin \alpha). \quad (8.28)$$

На рисунке 8.29 приведены зависимости изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 для различных значений углов раскрытия трещины.

Наиболее важной характеристикой, определяющей направление выхода излучения из трещины β_n , координату изменения направления распространения излучения $(x_i, x_{i\dot{\alpha}\delta})$ и интенсивность отраженного излучения является n – число переотражений излучения в трещине.

При повороте плоскости симметрии трещины ($\varphi_1 \neq 0$):

$$n = \left(\frac{\pi}{2} - (\alpha \pm \varphi_1) \right) / \gamma, \quad (8.29)$$

где «+» соответствует повороту плоскости симметрии трещины в сторону источника, «-» – в сторону приемного объектива (8.29).

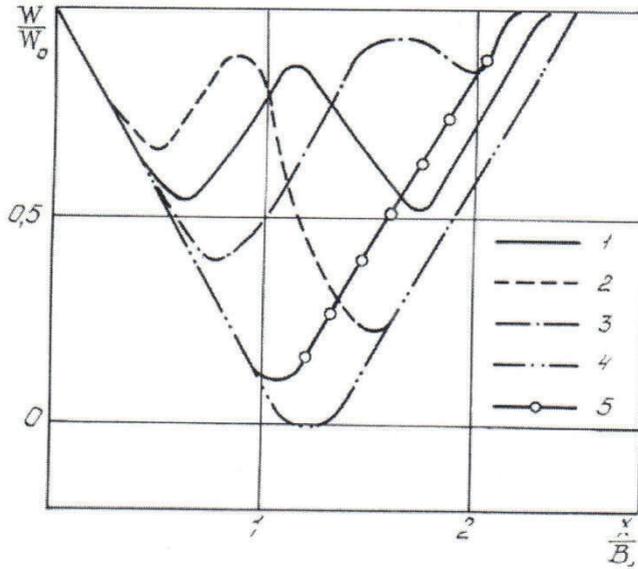


Рисунок 8.29 – Зависимость изменения относительной величины сигнала W/W_0 от безразмерной координаты x/B_1 для $\alpha = 30^\circ$ и различных значений угла раскрытия трещины: 1 – $\gamma = 30^\circ, n = 2, \frac{S}{B_1} = 1,15$;

2 – $\Delta\gamma = 3^\circ, n = 1,8, \frac{S}{B_1} = 1,3$; 3 – $\Delta\gamma = -3^\circ, n = 2,2, \frac{S}{B_1} = 1,02$;

4 – $n \rightarrow \infty, \frac{H_1}{B_1} = 1, \frac{S}{B_1} = 1,3$; 5 – $\frac{S}{B_1} = 1,02$

Заметим что значение n , определяемые по зависимостям (8.28), (8.29), могут иметь как целые, так и дробные значения в зависимости от значений α и γ , и представляют собой интегральную характеристику трещины. Целым значениям n соответствует $x_i = x_{i\text{до}} = 0$, т. е. все излучение, выходящее из трещины, распространяется в одном направлении. Для дробных значений n , например $n = 2,2$, при $x < x_i$ число переотражений в трещине равно 3 (данная часть излучения распространяется в направлении источника), а для $x > x_i$, число переотражений в трещине равно 2 (данная часть излучения распространяется в направлении приемного объектива).

Значение n определяет вид зависимости $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$. При четных значениях

n ($n = 2, 4, \dots, 2n$) и $S / \left(\frac{B_1}{\cos\alpha}\right) > 1$, зависимость $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$ представляет со-

бой симметричную кривую с максимумом или минимумом в центре, значение величины сигнала в центре трещины определяется величиной n . Для $n = 0, 1, 2, \dots, 3, \dots, 2n, \dots, 2n+1$ зависимость будет иметь вид кривой 3 на рисунке 8.29, значения W_1 / W_0 в максимуме и центре трещины определяются величиной n .

Для $n = 1, 2, 3, \dots, 4, \dots, 2n-1, \dots, 2n$ максимум на кривой $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$ смещен влево (зависимость 2 на рисунке 8.29), максимальное значение W / W_0 и W / W_0 и в центре трещины также определяются величиной n . При любых нечетных значениях n зависимость $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$ имеет минимум в точке $\frac{x}{B_1} = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / 2 \cos \alpha$

(аналогично кривой 4 на рисунке 8.29). Для $n \rightarrow \infty$ (для четных и нечетных значений n) зависимость $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$ имеет вид кривой 4 на рисунке 8.29.

Таким образом, зависимость относительной величины сигнала W / W_0 будет иметь периодический характер (рисунок 8.30).

Расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива H_2 оказывает существенное влияние на форму зависимостей: $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$ и $\frac{W_{\infty}}{W_0} = f(n)$.

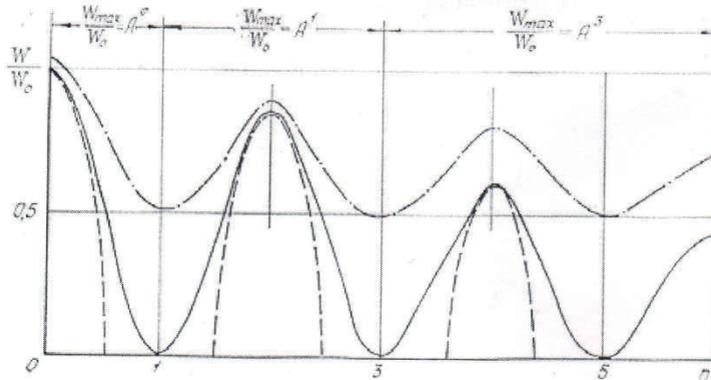


Рисунок 8.30 – Зависимость изменения относительной величины сигналов в центре трещины W_{∞} / W_0 от безразмерного параметра n при различных значениях высоты расположения приемного объектива над поверхностью H_1 соотношениях размеров пятна и ширины трещины:

$$\frac{(B_1 / \cos \alpha)}{S} / S : 1 - H_2 = 0, \quad \frac{(B_1 / \cos \alpha)}{S} / S = 1, 2 - H_2 = B_1,$$

$$\frac{(B_1 / \cos \alpha)}{S} / S < 1, 3 - H_2 = 0, \quad \frac{(B_1 / \cos \alpha)}{S} / S = 2.$$

Только при $\beta_n = \pm\alpha$ при любых значениях H_2 вид зависимости $\frac{W}{W_0} = f\left(\frac{x}{B_1}\right)$ остается неизменным, значение W_{∞}/W_0 не зависит от соотношения H_2 / B_1 .

В остальных случаях в соответствии с полученными зависимостями с увеличением расстояния от исследуемой поверхности до приемного объектива происходит снижение относительной величины сигнала. При $\frac{H_2}{B_1} > 0$ функция $\frac{W_{\infty}}{W_0} = F(n)$

не является непрерывной и имеет вид зависимости 2 на рисунке 8.29. При $\frac{H_2}{B_1} \geq 1$ значение относительной величины сигнала в центре трещины при четных значениях n равно $\frac{W_{\infty}}{W_0} = A^{n-1}$. Для других значений n $\frac{W_{\infty}}{W_0}$ равно нулю.

Описанная в математической модели область изменения значений угла раскрытия трещины соответствует $20^\circ < \gamma < 60^\circ$. ($1 < n < 3$). Область изменения угла γ , соответствующая различным видам повреждений (окисная пленка, износ поверхности, царапины, глубокие и неглубокие трещины), охватывает $0 \leq \gamma \leq 90^\circ$.

Рассмотренную область изменения значений угла γ можно условно разбить на несколько областей, каждая из которых соответствует определенному виду повреждений:

1. Глубокие трещины ($n > 6$). Для этого вида повреждений на кривой изменения относительной величины сигнала $\frac{W}{W_0}$ от координаты $\frac{x}{B_1}$ имеется минимум в точке, соответствующей середине трещины при любых значениях H_2 и $\gamma = \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) / n$.

2. Неглубокие трещины ($2 < n < 6$). Для таких повреждений на кривой изменения $\frac{W}{W_0}$ от координаты $\frac{x}{B_1}$ имеется максимум в точке $\frac{x}{B_1} = H_2 \operatorname{tg} \gamma + B_1 / 2 \cos \alpha$.

При $\frac{H_2}{B_1} = 1$.

3. Царапины ($n < 2$). Для этого вида повреждений характерно $\frac{H_2}{S} < 1$

и $\frac{S}{B_1} \geq 0, W / W_0 > 0$ при всех значениях $\frac{x}{B_1}$ для любых значений γ .

4. Износ поверхности ($0 < n < 1$). По сравнению с перечисленными повреждениями поверхности, этот дефект характеризуется большей протяженностью и более высокими значениями $\frac{W}{W_0}$ в центре дефекта: $n = 1$ соответствует отражению

излучения от поверхности повреждения и распространению отраженного излучения в направлении источника ($\gamma < 90^\circ$); $n = 0$ соответствует однократному отражению излучения от поверхности и его распространению в направлении приемного объектива, $\gamma = 90^\circ$.

5. Окисная пленка на поверхности ($n \approx 0$). Данное повреждение характеризуется изменением цветности и шероховатости поверхности при $H_2 = 0$ ($n = 0, \gamma = 90^\circ$). Для выявления такого дефекта H_2 не оказывают существенного влияния. В отличие от других дефектов, окисная пленка характеризуется увеличением разброса величины $\frac{W}{W_0}$, а не снижением или увеличением относительной величины сигнала.

Для двух различных углов падения излучения отношение n_1 / n_2 будет иметь вид:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\frac{\pi}{2} - (\alpha_1 \pm \varphi_1)}{\frac{\pi}{2} - (\alpha_2 \pm \varphi_1)}. \quad (8.30)$$

На рисунке 8.31 показаны зависимости $n_2 = f(n_1)$, построенные в соответствии с зависимостью (8.30) для различных значений $\alpha_1, \alpha_2, \varphi_1$.

Зная n_1 / n_2 , можно определить величину φ_1 , а затем γ по зависимостям (8.30) и (8.29). Для $20^\circ < \alpha_1, \alpha_2 < 45^\circ$ на зависимости $n_2 = f(n_1)$ также можно выделить области, соответствующие различным видам повреждений: $n = 0$ соответствует бездефектной поверхности или поверхности с наличием окисной пленки (по сравнению с бездефектной поверхностью окисная пленка характеризуется изменением средней величины сигнала W_0 и увеличением разброса $\frac{W}{W_0}$ относительно среднего значения); I – соответствует абразивному износу и прогибу

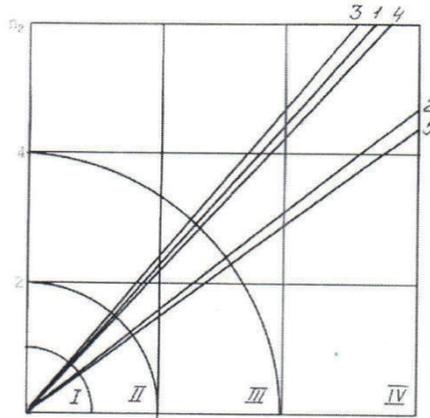


Рисунок 8.31 – Зависимость безразмерного параметра n_2 от значений безразмерного параметра n_1 при различных значениях углов падения излучения α_1, α_2 и угла поворота плоскости симметрии трещины φ_1 :
 1 – $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 20^\circ, \varphi_1 = 0^\circ$; 2 – $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 45^\circ, \varphi_1 = 0^\circ$;
 3 – $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 20^\circ, \varphi_1 = +5^\circ$; 4 – $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 20^\circ, \varphi_1 = -5^\circ$;
 5 – $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 45^\circ, \varphi_1 = +5^\circ$.

поверхности ($0 < n < 1$); II – область царапин ($1 < n < 2$); III – область неглубоких трещин ($2 < n < 6$); IV – область глубоких трещин ($n > 6$).

Основными критериями подобия при рассмотрении процесса отражения излучения от поверхности являются:

1) n – число переотражений излучения в трещине или другом элементе поверхности. Этот параметр является интегральной характеристикой дефекта и зависит от его геометрии и угла падения излучения. Параметр n численно равен отношению длины кривой, образованной пересечением плоскости падения излучения с поверхностью трещины к проекции ширины трещины под углом падения излучения на эту кривую. В общем случае для трещины, форма которой описывается аналитической зависимостью $f(x, y)$, параметр n определяется соотношениями:

$$\int_L f(x, y) dl = \sum_{i=1}^n l_i,$$

$$\int_{l_i} f(x, y) dy = S \operatorname{ctg} \alpha_i. \quad (8.31)$$

Как видно из полученных зависимостей, n определяет не только среднее число переотражений излучения в трещине, но и ширину, и направление распространения выходящих из трещины пучков;

2) $K_1 = B_1 / \lambda$ – параметр оптической системы; при $B_1 / \lambda \ll 1$ измеряется интенсивность переотраженного излучения на всех элементах поверхности с характерным размером $\geq B_1$ и рассеяние на элементах микротопологии

поверхности. $K_2 = \frac{B_1}{S}$ – характеризует соотношение диаметра пятна излучения

на поверхности и размеров дефектов (элементов поверхности). Этот параметр определяет разрешающую способность оптической системы при выявлении элементов поверхности, ведущих к переотражению излучения. При заданной величине B_1 могут быть выявлены повреждения, для которых выполняется соотношение $K_2 = \frac{B_1}{S} \leq 2$. Влияние элементов поверхности с меньшими размерами

($K_2 \leq 2$) усредняется в пределах пятна и не приводит к значительному изменению величины отраженного сигнала. Ширина трещины может быть наиболее точно определена при $K_2 = \frac{B_1}{S} \leq 1$, в этом случае наблюдается наибольшее снижение величины сигнала при наличии трещин.

3) $K_3 = \frac{K_1}{K_2} = \frac{S}{\lambda}$ – является характеристикой дефекта (элемента поверхности), не зависимой от параметров оптической системы. Построены зависимости:

$E_3 = f(K_1)$ при $K_3 \leq 1$, $E_3 = f(K_3)$ при $K_1=1$, $E_3 = f(K_3)$ и $E_2 = f(K_3)$ (рисунки 8.32, 8.33). При $n > 2$ наибольшее влияние на значение относительной величины сигнала оказывает величина E_3 ; при $0 < n < 2$ переотражение (величина E_3) и рассеяние на микронеровностях поверхности (величина E_2) имеют одинаковый порядок.

Для экспериментального подтверждения теоретических зависимостей влияния формы трещины (угла раскрытия трещины и расположения плоскости симметрии трещины) на изменение интенсивности излучения, отраженного на поверхности, использовался источник с равномерным распределением интенсивности излучения круглого сечения. Приемный объектив с круглым сечением устанавливался над исследуемой поверхностью на высоте H_1 , диаметр приемного объектива был равен диаметру источника излучения. Угол падения излучения составлял $\alpha = 30^\circ$. Угол α_2 определял расположение плоскости наблюдения относительной исследуемой поверхности и был равен 0, если плоскость наблюдения перпендикулярна направлению распространения зеркально отраженного излучения от бездефектной поверхности. Относительная ширина трещины для всех случаев была равна $\frac{S}{D_2} = 1,15$. Относительная глубина трещины S / H_2 изменя-

лась в диапазоне $\frac{S}{H_2} = 0,65 \dots 1,44$, $S / H_2 = 0,65$, соответствовала $\gamma = 18^\circ$,

$S / H_2 = 1,44$ соответствовала $\gamma = 35,8^\circ$ (S – ширина трещины; H_2 – глубина

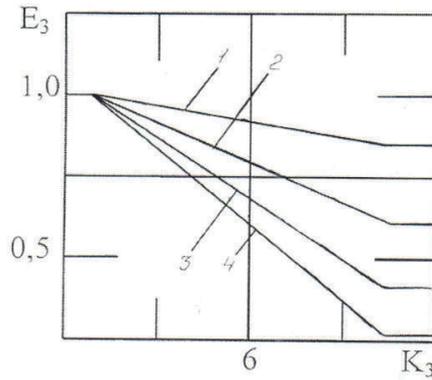


Рисунок 8.32 – Зависимость относительной величины переотраженного сигнала в центре дефекта E_3 от параметра геометрии K_3 при $K_1 > 1$: 1– $n = 2$, 2– $n = 4$, 3– $n = 6$, 4– $n = 8$

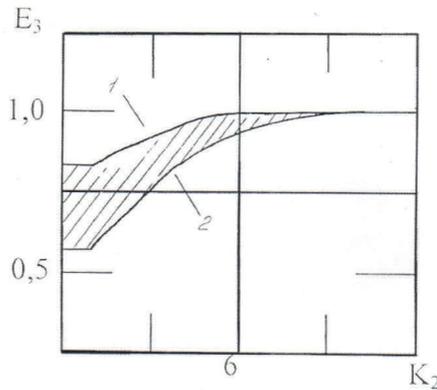


Рисунок 8.33 – Влияние параметра E_2 на величину переотраженного сигнала: 1 – $1 - W_{max} / W_0$ для $n = 2$, 2 – $W_{\delta, \delta} / W_0$ для $\alpha = 30^\circ$ и $\gamma = 27^\circ$

трещины). Как показывают измерения, при $\alpha_2 = 0^\circ$ и $\alpha = \gamma$ относительная величина сигнала не зависела от высоты расположения приемного объектива над поверхностью, и при всех значениях H_1 кривая имела один и тот же вид. Здесь введены обозначения: γ – угол раскрытия трещины; φ_1 – угол поворота плоскости симметрии трещины вокруг линии пересечения плоскости симметрии трещины с исходной поверхностью; φ_2 – угол наклона плоскости симметрии трещины к плоскости, перпендикулярной данной плоскости. При $\frac{S}{D_2} > 1$ значения относи-

тельной величины сигнала W / W_2 не зависели от соотношения ширины трещины и диаметра пятна, вид которой определялся конфигурацией трещины (значениями углов γ, φ_1 и φ_2). При $\frac{S}{D_2} < 1$ для той же трещины значения относительной

величины сигнала W / W_0 возрастали, при $\frac{S}{D_2} \rightarrow 0$, $W / W_0 \rightarrow 1$ для всех точек

поверхности независимо от наличия дефектов, выявление трещин невозможно (этот вывод вытекает из зависимостей математической модели). Максимальное значение относительной величины сигнала на поверхности трещины при $\alpha = \gamma$ соответствовало центру трещины ($\frac{x}{D_2} = \frac{S}{2D_2} + 1 / 2 \cos \alpha$) и было равно при чет-

ном значении числа переотражений в трещине: $\frac{W}{W_0} = A^{(n-1)}$, где A – коэффициент

отражения поверхности трещины; n – число переотражений в трещине. При нечетных значениях n и $n \rightarrow \infty$ ($n > 6, \frac{S}{H_2} < 1$) $W / W_0 \rightarrow 0$ для указанного значе-

ния x / D_2 при $\frac{S}{D_2} > 1$.

При уменьшении угла раскрытия трещины максимум на кривой смещался в сторону приемного объектива. Величина максимума и его смещение зависели от угла раскрытия и глубины трещины, а также расстояния от поверхности до приемного объектива.

Заметим, что изменение положения плоскости наблюдений ($\alpha_2 = 0^\circ$) оказывает существенное влияние на форму кривой W / W_0 . Для $\alpha = \gamma = 30^\circ$ так же, как и при $\alpha_2 = 0^\circ$, сохраняется значение относительной величины сигнала в максимуме и расположение максимума при всех значениях $\alpha_2 = 0^\circ$. Значение W / W_0 в точках, соответствующих прохождению центра пятна через края трещины ($\frac{x}{D_2} = 0,577$ и $\frac{x}{D_2} = 1,73$) снижается с ростом α_2 . Для трещин с углами

$\alpha - \gamma$ характерно появление максимумов при $x / D_2 = 0,8-0,9$, значение W / W_0 в максимуме возрастает с ростом α_2 , при $\frac{x}{D_2} = 1-1,6$ наблюдается минимум,

значение W / W_0 в этой точке снижается с ростом α_2 . Для $\gamma = 34^\circ$ максимальное значение $\frac{W}{W_0} = 0,67$ при $\frac{x}{D_2} = 0,9$ и $\frac{W}{W_0} = 0$ при $\frac{x}{D_2} = 1,5$ соответствуют

$\alpha_2 = 75^\circ$. Для $\gamma = 27^\circ$ и $\alpha_2 = 75^\circ$ максимальное значение $\frac{W}{W_0} = 0,85$ при

$$\frac{x}{D_2} = 0,83, \frac{W}{W_0} = 0 \text{ при } \frac{x}{D_2} = 1,04.$$

Результаты исследований показали, что расстояние от рассматриваемой поверхности до приемного объектива H_1 оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой W / W_0 . При $\frac{H_1}{D_2} \square 1$ форма

кривой не зависит от значений углов $\gamma, \varphi_1, \varphi_2$ и определяется только шириной трещины S и соотношением ширины трещины и диаметра пятна S / D_2 . Соотноше-

ние $\frac{S}{D_2}$ не оказывает влияния на определение характера трещины при $\frac{S}{D_2} > 1$.

При $\frac{S}{D_2} < 1$ для той же трещины значения относительной величины сигнала $\frac{W}{W_0}$

возрастают, при $\frac{S}{D_2} \rightarrow 0$ $W / W_0 \rightarrow 1$ для всех точек поверхности независимо от

наличия дефектов, выявление трещин невозможно. Поворот плоскости симметрии трещины (изменения величины угла φ_1) возможно выявить для неглубоких

трещин ($\frac{S}{H_2} > 1$) при $\gamma - \frac{\pi - \alpha}{2n}$ и $-5^\circ < \varphi_1 < 5^\circ$. При большем угле поворота

трещины и для глубоких трещин значения угла φ_1 не влияют на форму кривой, так как излучение, переотраженное поверхностью трещины, не попадает на приемный объектив. Наклон плоскости симметрии трещины (изменения величины угла φ_2) также приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой сигнала

измерений. Изменение положения плоскости наблюдения наиболее существен-

ное влияние оказывает при $\gamma - \frac{\pi - \alpha}{2n}$. При $\alpha_2 = 0^\circ, \varphi_1 = 0^\circ, \varphi_2 = 0^\circ$ появляется

максимум в левой части кривой ($\frac{x}{D_2} < 1$) и минимум в правой части ($\frac{x}{D_2} \rightarrow 1$),

с ростом α_2 возрастает значение $\frac{W}{W_0}$ в максимуме и снижается значение $\frac{W}{W_0}$

в минимуме. Несмотря на большую чувствительность к изменению угла раскрытия трещины при $\alpha_2 = 0^\circ$, изменение ориентации плоскости наблюдения может привести к снижению разрешающей способности метода при $\alpha_2 \geq 45^\circ$, так как поворот плоскости наблюдения при неизменном значении размеров приемного объектива равносильно снижению его площади в плоскости $\alpha_2 = 0^\circ$.

Оборудование для обнаружения поверхностных дефектов по результатам измерения интенсивности отраженного лазерного излучения при сканировании по поверхности детали включает: гелий-неоновый лазер ЛГИ-224-1 ($\gamma = 0,6328$ мкм); стеклянную пластину для формирования опорного сигнала; два оптических ваттметра поглощаемой мощности ОМЗ-65 для регистрации сигналов опорного и измерительного каналов; плоские зеркала и собирающие линзы для направления излучения от источника к исследуемой поверхности и отраженного от поверхности излучения к фотоприемнику; устройство для перемещения образца. Величина опорного сигнала составляла $\sim 6\%$ от интенсивности источника излучения.

Были исследованы поверхности следующих образцов: из титанового сплава ВТ-14, из химически полированного алюминия АД-1М с покрытием на основе полисилоксанового масла, стеклотекстолита АФТ-2П. Профилограммы поверхностей образцов были записаны на профилографе модели 250 завода «Калибр».

Как показали исследования, резкое снижение интенсивности отраженного излучения на величину до 50...98 % свидетельствует о наличии царапин, трещин и повреждения покрытий. Размеры дефекта определяются разностью координат, соответствующих резкому снижению сигнала и его возрастанию до прежнего уровня. Вероятность распознавания дефектов зависит от соотношения размеров пятна излучения на поверхности и дефекта, а также шага сканирования и размера дефекта. Распознавание дефекта невозможно, если его площадь значительно меньше площади сканирующей апертуры и шаг сканирования превышает размеры дефекта. Наибольшая вероятность распознавания дефекта достигается в том случае, если диаметр пятна излучения на поверхности не превышает размеров дефекта и равен шагу сканирования. Разброс величины сигнала W / W_0 увеличивается с ростом шероховатости поверхности. Искривлению поверхности образца соответствует монотонное повышение или снижение величины сигнала W / W_0 с ростом координаты x / x_0

(образец из химически полированного алюминия с покрытием на основе полисилоксанового масла). Изменению шероховатости на участке поверхности образца соответствует изменение среднего уровня величины W / W_0 (образец из стеклотекстолита АФТ-2П; $Ra = 7,45 - \frac{W}{W_0} = 0,49$; $Ra = 4,8 - \frac{W}{W_0} = 1,1$).

Износ участка поверхности образца из титанового сплава ВТ-14 характеризуется увеличением шероховатости и отклонением средней линии профиля, что соответствует снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца.

Наличие царапин, трещин и повреждений покрытий приводит к резкому снижению сигнала W / W_0 . Возможно также резкое увеличение интенсивности отраженного излучения (образец из стеклотекстолита). Наиболее сильное снижение сигнала отмечается при наличии трещин ($\frac{W}{W_0} \approx 0,03$). Наличие воды на по-

верхности образца приводит к снижению среднего сигнала W_0 , величина которого зависит от материала образца. Для образца из титанового сплава ВТ-14 слой воды толщиной 1,5 мм приводит к снижению интенсивности излучения, отраженного от поверхности образца, в два раза. Наличие повреждения регистрируется, так же как и на сухой поверхности. При смачивании поверхности образца водой происходит смещение пятна излучения на фотодиоде, величина которого зависит от толщины слоя жидкости.

Существенное уменьшение габаритов испытательного оборудования возможно при использовании полупроводниковых лазеров в качестве источников излучения. Были проведены исследования флуктуации их мощности, распределения плотности мощности и отклонения излучения в пространстве. Наиболее распространенными материалами для лазерных диодов являются кристаллы, полученные на основе GaAs и InP с активной областью на основе материалов тройных и четверных систем. Примерами таких лазеров являются GaAlAs/GaAlIn AlGa-InP/InP лазерные диоды. Преимуществом лазеров с четвертной системой являются: изопериодичность гетероструктуры и отсутствие температурных деформаций, связанных с несоответствием параметров решеток подложки и активной области; высокая оптическая плотность зеркал, отсутствие «дефектов темных линий»; слабое участие дислокаций в процессе деградации и, вследствие этого, более высокая долговечность и выходная мощность; отсутствие изгибов на ватт-амперной характеристике и большая стабильность оси диаграммы направленности.

По сравнению с другими типами лазерных диодов лазеры с квантово-размерными структурами имеют в три раза меньшее значение порогового тока и более высокое значение характеристической температуры (200К) и, следовательно, более слабую зависимость порогового тока и выходной мощности от температуры активной области окружающей среды. Как показали исследования, они характеризуются отсутствием изгибов и на ватт-амперной характеристике и более высокой дифференциальной эффективностью. Лазеры с квантово-размерными структурами сохраняют одномодовый режим и длину волны генерации при накачке импульсным током высокой частоты.

Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантово-размерными структурами с активной областью на основе материалов четвертных систем.

Таким образом, построена математическая модель, описывающая изменение относительной величины сигнала W / W_0 от безразмерной координаты x / B_1 при сканировании по поверхности (B_1 – поперечное сечение источника излучения) при различных соотношениях углов $\alpha \dot{=} \gamma$ (угла падения излучения и половины угла раскрытия трещины), когда размер поперечного сечения пучка и ширина трещины приблизительно равны (одного порядка), $\Delta\gamma < \gamma$. На участке поверхности с наличием трещины кривая изменения относительной величины сигнала имеет максимум или минимум в зависимости от глубины трещины. Угол раскрытия трещины, при котором имеется максимум на кривой, зависит от коэффициента отражения поверхности и угла падения излучения. Результаты исследований показали, что расстояние от исследуемой поверхности до приемного объектива H_1 оказывает наибольшее влияние из всех параметров оптической системы на форму кривой W / W_0 . Поворот плоскости симметрии трещины возможно выявить лишь для неглубоких трещин ($S / H_2 > 1$) при $-5^\circ < \varphi_1 < 5^\circ$, при большом угле поворота трещины и для глубоких трещин значение угла φ_1 не влияет на форму кривой. Наклон плоскости симметрии трещины приводит к смещению максимумов и минимумов на кривой отраженного сигнала. Изменение положения плоскости наблюдения приводит к появлению дополнительных максимумов и минимумов. Наиболее приемлемыми для использования в контрольно-измерительных системах являются лазерные диоды с квантово-размерными структурами с активной областью на основе материалов четвертных систем. Для учета флуктуации мощности источника излучения в процессе измерений необходимо формирование опорного канала.

Разработанная математическая модель позволяет описывать формирование пространственно-временных характеристик отраженного лазерного сигнала на участках с дефектами поверхностного слоя в зависимости от вида повреждений. Безразмерные параметры процесса измерений при выявлении поверхностных повреждений позволяют установить энергетическое соответствие зондирующих сигналов геометрическим параметрам поверхностных дефектов и однозначно установить характер повреждений: K_1 – параметр оптической системы; K_2 – параметр, характеризующий соотношение диаметра пятна излучения на поверхности и размеров дефектов и определяющий разрешающую способность оптической системы; K_3 – параметр дефекта (элемента поверхности). Основной характеристикой дефекта является параметр n , который численно равен числу переотражений. Определены его характерные значения при $\alpha = \pi / 6$. Выявлена периодическая зависимость величины отраженного сигнала в центре трещины от угла раскрытия трещины и параметра n .

Доказана необходимость сканирования поверхности при двух различных углах падения излучения, при этом величины n_1 и n_2 однозначно определяют геометрию повреждения. При рассмотрении влияния параметров оптической системы на вероятность распознавания различных видов поверхностных повреждений было установлено, что наибольшее влияние на относительную величину сигнала

оказывает высота расположения приемного объекта над поверхностью. Ее оптимальное значение – $H_2 / B_1 \leq 1$.

8.8. Разработка принципиальных схем автоматического оборудования контроля качества продукции машиностроения

Изложенные выше методы неразрушающего контроля и их исследования позволили разработать ряд новых принципиальных схем автоматов контроля изделий в машиностроении.

8.8.1. Автомат контроля дисбаланса изделий ультразвуковым методом

Известно, что контроль дисбаланса деталей массового производства с малой массой и размерами остается все еще сложной задачей. Один из путей его решения – автоматизация контроля сборного изделия цилиндрической формы, состоящего из двух деталей, изготовленных из разных материалов. Установлено, что на неуравновешенность, т. е. на смещение центра масс, в основном влияют колебания толщины стенок наружной детали. В связи с этим был разработан оригинальный метод измерения толщины стенки наружной детали в разных сечениях, который позволил путем пересчета автоматически получить величину радиального смещения центра масс сборного изделия. В качестве прибора применено ультразвуковое устройство.

Выведена формула радиального смещения центра масс от колебания толщины стенки наружной детали [72]:

$$e = \frac{r(\rho_a + r_i)}{2(R\rho_i + r\rho_a)}(t_{max} + t_{min}), \quad (8.32)$$

где e – величина радиального смещения центра масс; ρ_i и ρ_a – плотность материала наружной и внутренней детали; R и r – радиусы наружной и внутренней детали; t_{min} и t_{max} – максимальная и минимальная толщина стенок наружной детали.

При автоматическом контроле значение радиального смещения центра масс определяется путем измерения t_{min} и t_{max} . Величина радиального смещения центра масс по всей длине детали либо убывает, либо возрастает, исходя из анализа технологического процесса изготовления детали. Следовательно, для определения искомой величины достаточна информация в двух крайних точках. Тогда среднее значение будет:

$$e = \frac{e_1 + e_2}{2}.$$

На рисунке 8.34 приведена блок-схема автомата для контроля дисбаланса сборной детали. Контролируемая деталь поступает в моечную машину (ММ), где очищается от стружки, пыли, грязи и затем сушится в сушильной камере (СК). Далее детали поступают в бункерно-загрузочное устройство (БЗУ) с шибберным механизмом, которое ориентирует и по лотку поштучно подает на шнековый вал, приводимый во вращение приводом (П). Детали шнеком перемещаются в рабочую зону контроля, одновременно с поступательным движением деталь совершает вращательное движение вокруг своей оси. Ультразвуковая головка за один оборот детали посылает определенное количество импульсов высокой частоты, которые после отражения поступают в блок автоматического контроля (БАК). В нем преобразуется длительность импульса, пропорционального t_1, t_2, \dots, t_m в 2–10 код, определяется t_{min} и t_{max} и с помощью линии ЭЦВМ по соответствующим формулам вычисляется величина РСЦМ детали. Информация о дисбалансе автоматически управляет устройством разбраковки (УР), и детали из лотка попадают в транспортно-накопительные тары (ТНТ). Для анализа контролируемых деталей из БАК информация о РСЦМ передается на машинную печать (МП).

Производительность автомата 200 дет/мин. Контроль деталей происходит при их непрерывном транспортировании шнековым механизмом, что значительно повышает производительность, так как снижаются потери времени на холостые ходы. Максимальная глубина прозвучивания на частоте 10 МГц составляет 30 мм. Точность измерения толщины стенки: для стали $\pm 7,8$ мкм; алюминия $\pm 7,8$; меди $\pm 5,8$ мкм.

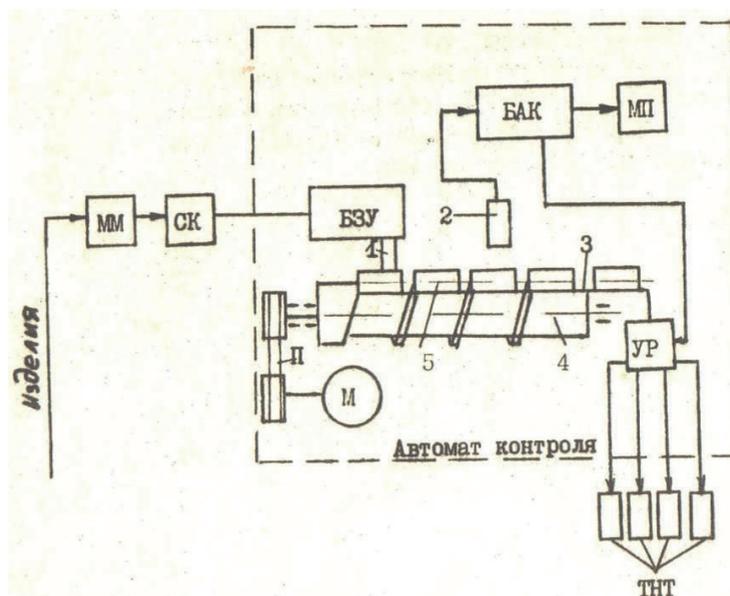


Рисунок 8.34 – Блок схема автомата: 1 – лоток; 2 – ультразвуковая головка; 3 – транспортное устройство; 4 – шнековый транспортер; 5 – контролируемое изделие

Точность измерения радиального смещения центра масс сборного изделия составляет $\pm(1,3 \times 10^3 v)K$, где v – скорость распространения звука в металле; K – коэффициент пропорциональности.

Автомат можно использовать в машиностроительной и приборостроительной промышленности для контроля дисбаланса сборных изделий массового производства.

8.8.2. Автомат контроля рельефных дефектов изделий

Одним из проблемных вопросов в машиностроении является автоматизация контроля наружных дефектов изделий. Это связано с тем, что во многих случаях участки контроля стали узким местом современного производства из-за низкой производительности, возможности ошибок при визуальном осмотре поверхности из-за необходимости контроля большого количества деталей, степени внимательности, состояния зрения, утомляемости и прочих психофизиологических факторов.

Для автоматизации контроля качества поверхности был разработан автомат контроля (рисунок 8.35), позволяющий исключить субъективную оценку достоверности эксперимента при проведении статических исследований контроля работоспособности. Быстродействие системы контроля зависит от выбранной скорости вращения и длины контролируемой детали. Для нашего случая время контроля одной детали составляло 1 с, а время смены деталей 0,5 с. В промышленном автомате контроля расчетная производительность составляет 1500 шт/мин, т. е. 0,04 с на контроль одной детали [73].

Принципиальная блок-схема оптического метода контроля показана на рисунке 8.36. Световой поток специального осветителя 1, отражаясь от поверхности детали 2, попадает на фотоприемник 3. При строго неизменном световом потоке осветителя количество световой энергии C_δ , попадающее на фотоприемник, пропорционально коэффициенту отражения ρ соответствующего участка поверхности, т. е. $C_\delta = \rho_1$. В фотоприемнике энергия света преобразуется в энергию электрического тока. При линейной характеристике фотоприемника и нормальном режиме его работы напряжение на его выходе V_δ будет пропорционально величине светового потока, падающего на фотоприемник:

$$V_\delta = KC_\delta = R\rho_1, \quad (8.33)$$

где K – коэффициент пропорциональности, характеризующий конструктивное выполнение оптической схемы.

Чувствительность фотоприемника должна быть достаточной, чтобы обеспечить изменение напряжения на его выходе при изменениях коэффициента отражения при наличии дефекта поверхности. Напряжение с фотоприемника 3 подается на функциональный усилитель-преобразователь 4. Напряжение на выходе усилителя-преобразователя представляет собой преобразованный по величине, форме

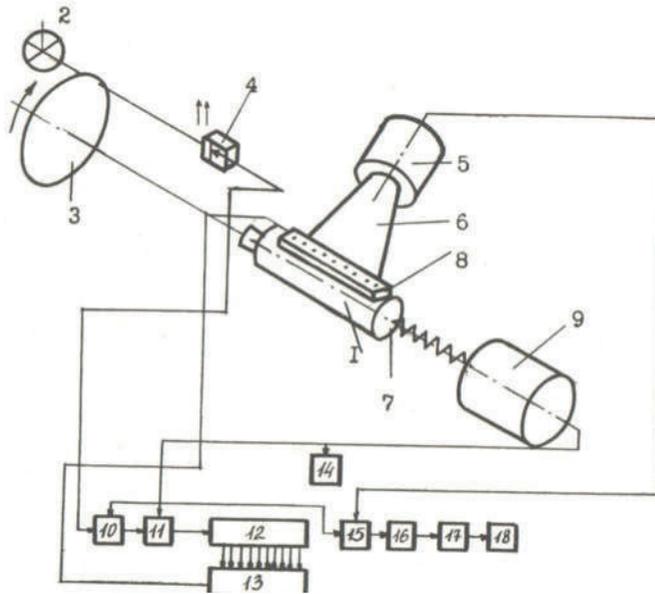


Рисунок 8.35 – Блок-схема установки контроля наружной поверхности: 1 – деталь; 2 – лампа накаливания; 3 – диск; 4 – фотодиод; 5 – фотоприемник; 6 – волоконнооптический преобразователь; 7 – зажимный корпус; 8 – линейка светодиода; 9 – электромагнит; 10 – формирователь тактовых импульсов; 11 – устройство управления; 12 – распределитель; 13 – ключ управления светодиодами; 14 – схема управления электромагнитом; 15 – электронный коммутатор; 16 – усилитель; 17 – формирователь; 18 – устройство разбраковки

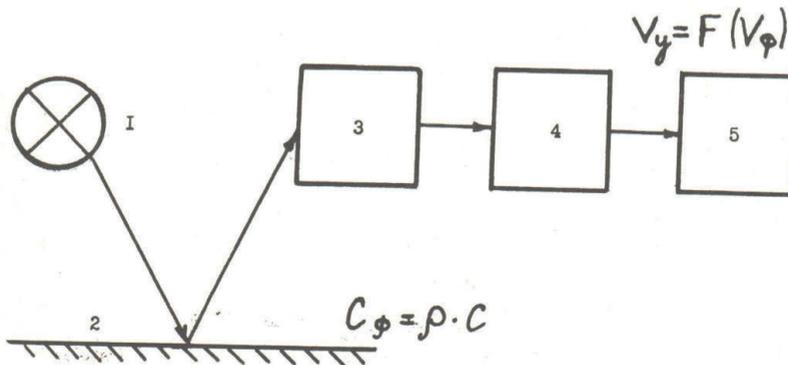


Рисунок 8.36 – Блок-схема оптического метода контроля наружной поверхности: 1 – осветитель; 2 – деталь; 3 – фотоприемник; 4 – усилитель; 5 – исполнительный механизм

и мощности сигнал фотоприемника, достаточный для включения управляющей системы 5 (исполнительного органа, который осуществляет разбраковку).

Эксплуатация автомата показала неоднозначность выявления различных видов дефектов по поверхности. На практике встречаются различные виды дефектов: прижоги, раковины, царапины, трещины и т. д. Эти виды дефектов различаются не только по своим геометрическим размерам, но и природой возникновения. Критерием выявляемости дефекта считают соотношение сигнал/шум, равное $1,5 \div 2$.

Анализ результатов экспериментов позволяет сделать вывод о работоспособности созданного автомата контроля качества изделий.

Разработанный автомат может быть использован на всех машиностроительных предприятиях, выпускающих продукцию массового производства.

8.8.3. Автомат контроля наружных дефектов изделий типа тел вращения

Важнейшей проблемой при внедрении комплексной автоматизации в машиностроении является контроль качества наружных поверхностей изделий. Оценка качества наружных поверхностей продукции машиностроения определяется, в основном, визуально и, несмотря на совершенство зрительного аппарата человека, который обеспечивает достаточно высокую достоверность результатов, все же имеет ряд недостатков: малую производительность, быструю утомляемость, монотонность труда и др.

Визуальный контроль широко распространен в машиностроении и количество работников, занятых на данной операции, составляет 20 % от общего количества работающих. В связи с этим, замена визуального контроля автоматическим является актуальной задачей.

Наиболее перспективным методом является оптико-электронный контроль дефектов деталей. Преимущества метода: бесконтактность, безынерционность, высокая производительность и возможность автоматизации процесса контроля.

С использованием оптико-электронного метода был создан автомат контроля наружных дефектов деталей типа тел вращения [74]. Принципиальная схема автомата приведена на рисунке 8.37.

Из максимума поштучной выдачи деталь, под действием силы тяжести, скапываясь по желобу, останавливается в зоне захвата базирующего приспособления, которое зажимает и вращает ее. Для того чтобы исключить трение детали о поверхность желоба, ось вращения базирующих конусов несколько смещена вверх, и на ней дополнительно установлен диск с отверстием, которое в сочетании с осветителем, фотоприемником и формирующим устройством (на рисунке показано) образует оптико-механический генератор тактовых импульсов, частота которых зависит от передаточного отклонения привода и скорости вращения электродвигателя.

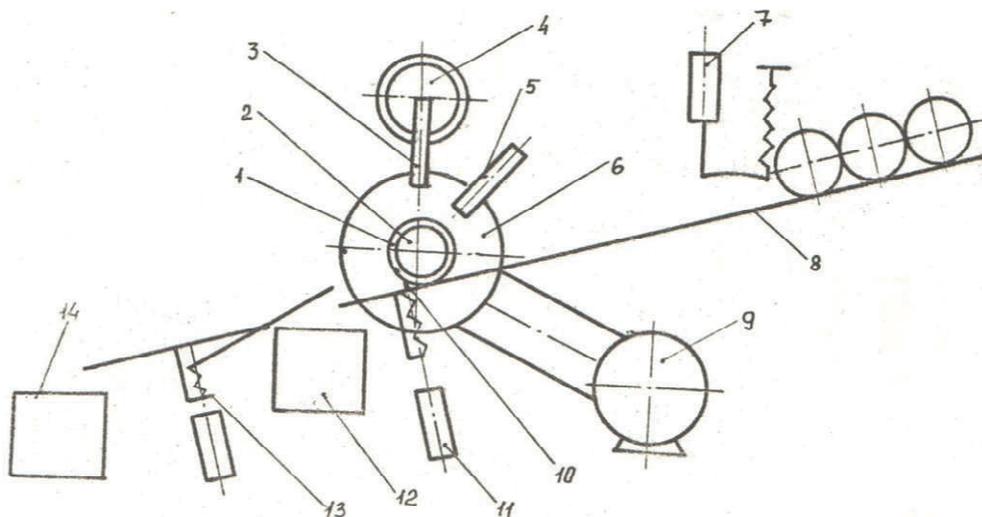


Рисунок 8.37 – Принципиальная схема автомата контроля: 1 – деталь; 2 – базировочный конус; 3 – щелевой волоконно-оптический преобразователь; 4 – фотоприемник; 5 – набор осветителей; 6 – диск с отверстиями; 7 – электромагнит механизма поштучной выдачи деталей; 8 – наклонный желоб; 9 – электродвигатель; 10 – подвижный упор; 11 – электромагнит; 12 – бункер бракованных изделий; 13 – механизм разбраковки; 14 – бункер годных изделий

Контроль поверхности осуществляется с помощью оптико-электронной схемы, фотоприемное устройство которой установлено над вращающейся деталью и состоит из набора светодиодов, щелевого волоконно-оптического преобразователя и фотоприемного умножителя.

Время контроля детали на позиции зависит от количества светодиодов в наборе, которое в свою очередь зависит от линейного размера изделий, скорости вращения детали и времени переключения светодиодов.

По окончании цикла контроля базировочные конусы разжимаются, и деталь движется по наклонному желобу к механизму разбраковки, который в зависимости от двоичного сигнала с оптико-электронной системы контроля, направляет ее в соответствующий бункер «годен» или «брак».

Управление автоматом контроля осуществляется от пульта управления, который имеет два режима работы – автоматический и ручной (для наладочных операций).

Расчетная производительность автомата составляет 3000 шт/час. В основном производительность автомата зависит от времени срабатывания исполнительных механизмов: базировочного приспособления, механизма отбраковки.

Время срабатывания их можно определить по следующей формуле:

$$t = \frac{mV_y}{R_{\gamma\delta} - R_{\pi\pi\gamma}}, \quad (8.34)$$

где m – масса подвижных элементов; V_y – установившаяся скорость движения подвижных элементов; $R_{\text{соп}}$ и $R_{\text{пр}}$ – соответственно сила сопротивления и прикладываемая сила.

Результаты опытной эксплуатации автомата позволили сделать следующие основные выводы:

- полученные соотношения сигнал/шум для различных типов дефектов, равные $1,5 \div 2$, являются достаточными для разбраковки деталей в потоке;
- установлены оптимальные параметры оптико-электронной системы: расстояние от детали – 10 мм, углы установки осветителя 35° и фотоприемника 15° ;
- обязательным условием надежной работы оптико-электронной системы является набор светодиодов с одинаковыми характеристиками и изготовление приемного волоконного светодиода в заводских условиях;
- автомат может быть легко перенастроен (смена приспособления, переустановка оптико-электронной системы) на другое изделие.

8.8.4. Автомат контроля наличия фасок у изделий типа тел вращения

Автомат предназначен для контроля наличия фасок у изделий. В станках-автоматах, роторных линиях с высокой производительностью обрабатываются изделия типа тел вращения: втулка, валики, оси и др., у которых должны быть фаски. Однако по разным причинам иногда автомат выдает эти изделия без фасок, тогда они являются непригодными для сборочного автомата. Автомат контроля наличия фасок изделий типа тел вращения состоит из следующих узлов: транспортного устройства, оптической головки, устройства разбраковки и электронной части, содержащей блоки питания и обработки электрического сигнала [75].

Загрузочно-транспортное устройство обеспечивает загрузку и захват контролируемого изделия, и транспортирование его к зонам контроля и разбраковки. Загрузочное устройство (рисунок 8.38) представляет собой лоток-накопитель, установленный под углом к плоскости вращения ротора транспортного устройства. К загрузочному устройству относятся также уголки, подвижно укрепленные в прорезях призм транспортного ротора и служащие для захвата контролируемых изделий из лотка накопителя.

Транспортное устройство имитирует ротор на две позиции (позиций может быть и больше) и состоит из привода, на валу которого укреплено коромысло. На периферийных частях коромысла установлены призмы, служащие для базирования контролируемых изделий на позициях контроля и разбраковки.

Оптическая головка автомата контроля (рисунок 8.39) состоит из осветителя, в качестве которого применен светодиод с инфракрасным спектром излучения, фотоприемника, в качестве которого применен фототранзистор с максимальной чувствительностью в инфракрасной области спектра. В целях упрощения

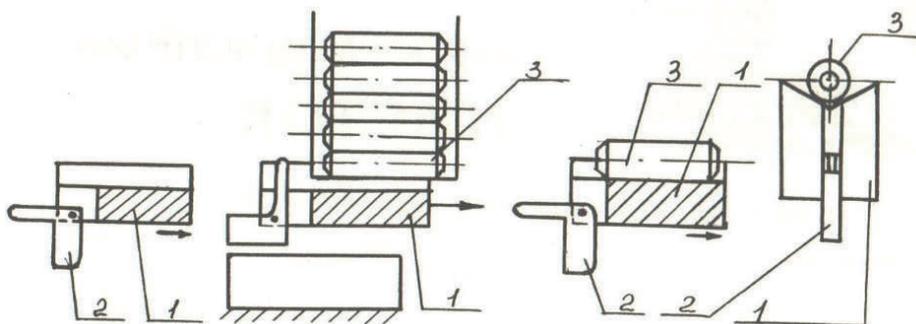


Рисунок 8.38 – Загрузочное устройство: 1 – призма транспортного устройства; 2 – уголок устройства загрузки; 3 – контролируемое изделие

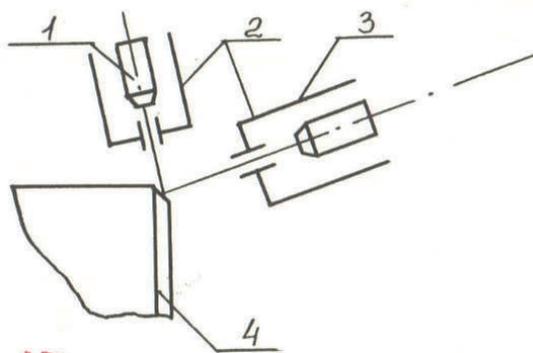


Рисунок 8.39 – Оптическая схема головки: 1 – осветитель; 2 – диафрагма; 3 – фотоприемник (фототранзистор ФТ1-К); 4 – контролируемое изделие

конструкции оптическая головка не содержит линз, и формирование светового потока осуществляется диафрагмами на осветителе и фотоприемнике.

Оптическая головка автомата расположена так, что плоскость контролируемой грани перпендикулярна плоскости головки. Только в этом случае на фотоприемник попадает максимальный уровень светового потока, отраженного от грани контролируемого изделия.

Устройство разбраковки состоит из двух упоров, один из которых является подвижным и управляется электромагнитом, другой неподвижно закреплен на панели. Электромагнит подвижного упора управляется от электронного блока обработки сигнала и срабатывает только при прохождении через зону контроля изделий с фаской, т. е. годных, а неподвижный упор снимает с призм транспортного ротора все оставшиеся изделия. Структурная схема электронной части автомата приведена на рисунке 8.40. Задающий генератор вырабатывает прямоугольные импульсы, частота которых стабилизирована кварцевым резонатором, обеспечивающим высокую стабильность частоты.

С задающего генератора импульсы поступают на делитель, где происходит деление частоты входных импульсов до частоты, соответствующей временным

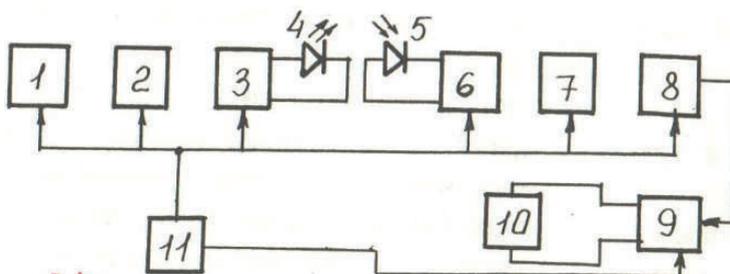


Рисунок 8.40 – Структурная схема автомата контроля: 1 – задающий генератор; 2 – делитель; 3 – усилитель; 4 – осветитель; 5 – фотоприемник; 6 – резонансный усилитель; 7 – амплитудный компаратор; 8 – одновибратор; 9 – усилитель тока; 10 – электромагнит устройства разбраковки; 11 – блок питания

параметрам применяемого светодиода. В данном случае частота входных импульсов принята равной 8 кГц. С делителя частоты прямоугольные импульсы поступают на усилитель тока, к выходу которого подключен светодиод. Отраженный от контролируемой грани изделия световой поток попадает на фотоприемник, который подключен к входу резонансного усилителя. Резонансный усилитель имеет узкую полосу пропускания, средняя частота которой равна 8 кГц. Усиленный сигнал попадает на вход амплитудного компаратора. Порог срабатывания амплитудного компаратора подбирается таким, чтобы он надежно срабатывал от уровня полезного сигнала и не срабатывал от сигнала помехи. При срабатывании амплитудного компаратора одновибратор формирует одиночный импульс, длительность которого несколько превышает время перемещения контролируемых изделий из зоны контроля к зоне разбраковки. Сформированный одновибратором импульс усиливается усилителем тока и попадает на обмотку электромагнита.

Таким образом, при прохождении через зону контроля годного изделия электромагнит разбраковки срабатывает за время, достаточное для перемещения изделия от зоны контроля до упора, управляемого электромагнитом.

Опытная эксплуатация автомата доказала его работоспособность. Он может быть использован на машиностроительных предприятиях, что позволит предотвратить выход из строя автоматических линий изготовления сверл и сборочных автоматов, предназначенных для сборки цепных передач.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Ермолов И.Н., Останин Ю.Я.* Методы и средства неразрушающего контроля качества: учеб. пособие для инж.-техн. спец. вузов. – М.: Высшая школа, 2003. – 368 с.
2. Технические средства диагностирования: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 672 с.
3. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник: в 2 кн. / под ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006.
4. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением № 1).
5. ГОСТ 16504–81. Испытания и контроль качества продукции.
6. ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
7. ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
8. Информационно-измерительная техника и технологии / под ред. проф. Г.Г. Раннева. – М.: Высшая школа, 2002. – 212 с.
9. Информационно-измерительная техника и технологии: учебник для вузов / В.И. Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др.; под ред. Г.Г. Раннева. – М.: Высшая школа. 2001. – 340 с.
10. *Раннев Г.Г.* Методы и средства измерений / Г.Г. Раннев. А.П. Тарасенко. – М.: Академия, 200. – 331 с.
11. *Грановский В.А., Сирая Т.Н.* Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
12. *Сурогина В.А.* Информационно-измерительная техника и электроника / В.А. Сурогина, В.И. Калашников, Г.Г. Раннев. – М.: Высшая школа, 2006. – 512 с.
13. *Волосов С.С., Педь Е.Н.* Приборы для автоматического контроля в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1970. – 307 с.
14. *Иванов А.Г.* Измерительные приборы в машиностроении. – М.: Машгиз, 1991. 212 с.
15. *Муслимов А.П., Васильев В.Б.* Автоматизация технологических процессов в машиностроении. – Бишкек, 2018. 221 с.
16. *Иванов А.Г.* и др. Измерительные приборы в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2013. – 254 с.
17. *Педь Е.Н.* и др. Активный контроль в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1976. – 215 с.
18. *Виглеб Г.* Датчики. Устройство и применение. – М.: Изд-во Мир, 1989. – 245 с.
19. *Kretschmar M. and Welsby S.* Capacitive and inductive Displacement Sensors, in *Sensor Technology Handbook // J. Wilson editor, 2005. Newnes: Burlington, MA.*

20. *Grimes C.A., Dickey E.C. and Pishko M.V. Encyclopedia of Sensors (10-Vol. Set) // American Scientific Publishers, 2006.*
21. *Pohanka M., Pavlis O. and P. Skladal. Rapid Characterization of Monoclonal Antibodies using the Piezoelectric immunosensor // Sensors. 2007. 7. – Pp. 341–353.*
22. *Clifford K. Ho, Alex Robinson, David R. Miller and Mary J. Davis. Over-view of Sensors and Needs for Environmental Monitoring, 2005. 5. – Pp. 4–37.*
23. *Современные датчики. Справочник / Дж. Фрайден; пер. с англ. Ю.А. Заболотной; под ред. Е.Л. Свинцова. – М.: Техносфера, 2005.*
24. *Датчики. Перспективные направления развития / А.Ф. Алейников, В.А. Гридчин, М.П. Цапенко. – Киев: Изд-во НГТУ, 2001.*
25. *Датчики в современных измерениях / А.Ф. Котюк. – М.: Радио и связь, 2006.*
26. *ГОСТ Р 51086–97. Датчики и преобразователи физических величин электронные. Термины и определения. Раздел 3. Термины и определения.*
27. *Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 2001. – 726 с.*
28. *Выборнов Б.И. Ультразвуковая дефектоскопия. – М.: Металлургия, 1974. – 240 с.*
29. *Гурвич А.К., Ермолов И.Н. Ультразвуковой контроль сварных швов. – Киев: Техника, 1992. – 457 с.*
30. *Ермолов И.Н. Методы ультразвуковой дефектоскопии. – М.: Изд-во МГИ, 2001. – 267 с.*
31. *Физические основы эхо- и теневого методов ультразвуковой дефектоскопии. – М.: Машиностроение, 1995. – 105 с.*
32. *Исакович М.А. Общая акустика. – М.: Наука, 2001. – 495 с.*
33. *Муслимов А.П. Разработка фотоэлектрического датчика для контроля поверхностных дефектороизделий типа тел вращения // Известия КГТУ. 2002. С. 5.*
34. *Королев М.В. Универсальный эхо-импульсный ультразвуковой толщиномер // Дефектоскопия. 2001. № 4. – С. 12–20.*
35. *Ланге Ю.В. Акустические методы неразрушающего контроля соединений в многослойных конструкциях // Дефектоскопия. 2003. № 3. – С. 70–80.*
36. *Методы неразрушающих испытаний / под ред. Р. Шарпа. – М.: Мир, 1985. – 495 с.*
37. *Физическая акустика / под ред. У. Мэзона. – М.: Мир, 2001. – 592 с.*
38. *Бакутин В.Н., Заика Ж.А., Карнов В.И. Определение дефектов пайки радиационным методом // Дефектоскопия. 1972. № 6. – С. 75–80.*
39. *Румянцев С.В., Добромыслов В.А., Борисов О.И. Неразрушающие методы контроля сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1976. 335 с.*
40. *Ремизов А.Л. Ультразвуковая дефектоскопия паяных соединений строительных металлоконструкций // В сб.: Пайка 2000. – Тольятти, 2000. – С. 89–95.*

41. *Ковшиков Е.К.* Неразрушающий контроль качества эвтектической пайки кристалла кремния при сборке интегральных схем // В сб. тр. ЦНИИточмаш. – М. С. 203.
42. Неразрушающий контроль и системы управления качеством сварных и паяных соединений. – М.: ЦРДЗ, 1992. – С. 129–133.
43. *Толмачев И.И.* Магнитные методы контроля и диагностики. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 216 с.
44. *Вайделих Д.* Импульсные вихревые токи // В кн. Методы неразрушающих испытаний. – М.: Мир, 1972. – 494 с.
45. *Герасимов В.Г.* Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. – М.: Энергия, 1992. – 160 с.
46. *Григулис Ю.К.* Электромагнитный метод анализа слоистых полупроводниковых и металлических структур. – Рига: «Зинатие», 2001. – 272 с.
47. *Дорофеев А.Л.* Индукционная структуроскопия. – М.: Энергия, 2001. – 176 с.
48. Метод вихревых токов для контроля производственных параметров / под общ. ред. И.Н. Шумиловского. – М.: Машиностроение, 1979. – 297 с.
49. Неразрушающие испытания. Справочник / под ред. Р. Мак-Мастера; пер. с англ. Кн. 2. – М.-Л.: Энергия, 1975. – 492 с.
50. *Сухоруков В.В.* Математическое моделирование электромагнитных полей в проводящих средах. – М.: Энергия, 2005. – 152 с.
51. *Ермаков И.Н., Останин Ю.А.* Методы и средства неразрушающего контроля качества. – М.: Высшая школа, 2003. – 368 с.
52. Технические средства диагностирования. Справочник / под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005. – 672 с.
53. Электромагнитные методы измерений и неразрушающего контроля // Сб. статей / отв. ред. П.А Халиев. – Екатеринбург: Урал. научн. центр АН СССР, 1982. – 118 с.
54. *Муслимов А.П., Грицун В.Г.* Автоматическое устройство контроля качества вершинок УКН-1. Серия 13. Вып. 4. – М.: ВОТ. 1989. 10 с.
55. *Муслимов А.П.* Автомат контроля дисбаланса изделий ультразвуковым методом. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2002. – 10 с.
56. *Еренчинов Д.К.* Разработка оптико-электронной системы контроля дефектов наружных поверхностей деталей типа тел вращения // Известия кирг. госуд. технич. ун-та. – Бишкек, 2010. – С. 8.
57. *Еренчинов Д.К.* Разработка устройства контроля и расчет его параметров // Известия кирг. госуд. технич. ун-та. – Бишкек, 2010. – 7 с.
58. *Еренчинов Д.К.* Исследование переотражения излучения в элементах поверхности. – Алматы: Магистраль, 2010. – 7 с.
59. *Фукс-Рябиновича Л.И., Епифонов М.В.* Оптико-электрические приборы. – Л.: Машиностроение, 1979. – 362 с.
60. *Chang P.T., Kaufman I., Shyong D.Y.* Detection and imaging of surface cracks by optical scanning // Mater. Eval. 1987. Vol. 45. – Pp. 943–945.

61. *Кукса Н.Н.* Влияние площади считывающей аппаратуры фотоэлектрического дефектоскопа на вероятность пропуска дефекта // Дефектоскопия. 1984. – С. 57–64 с.
62. *Белопухов В.Н., Волостников В.Г., Котляр В.В., Малов А.Н., Подвигин В.Н.* Когерентно-оптическое обнаружение дефектов на поверхности изделий. Лазерная технология и автоматизация исследований. – М.: Наука, 1989. – С. 111–115.
63. *Сазонникова Н.А., Мордасов В.И., Шуваев А.А.* Оптический способ оценки поверхностных повреждений // Компьютерная оптика. М.: МЦНТИ, 2000. – С. 106–110.
64. *Еренчинов Д.К.* Классификация оптико-электронных приборов. Акционерное общество «ДАСУ». – Алматы: Изд-во КазИНТИ, 2008. 7 с.
65. Инженерия поверхности и реновация изделий // Матер. 10-й юбил. межд. научно-технич. конф. – Киев, 2010.
66. *Лысенко О.* Фотоэлектрические датчики компании SICKAG. – М.: Энергоиздат, 43 с.
67. *Олссон Г., Пиани Дж.* Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский диалект, 2001.
68. Оптико-электронные приборы, их классификация [Интернет ресурс]: URL: <http://allrefs.net/c38/42k0e>
69. Обобщенная структурная схема ОЭП [Интернет ресурс]: URL: <http://studopedia.org/2-91454.html>
70. Как правильно выбрать фотоэлектрический датчик [Интернет ресурс]: URL: <http://www.kipinfo.ru/info/stati/?id=161>
71. Оптические (фотоэлектрические) датчики [Интернет ресурс]: URL: <http://www.poisk-ru.ru/s9494t3.html>
72. Устройство и принцип работы оптических датчиков [Интернет ресурс]: URL: <http://optex.ltd.ua/PhotoelectronicSensor.html>
73. *Муслимов А.П.* Автомат контроля дисбаланса изделий ультразвуковым методом. – Бишкек: КиргизНИИНТИ, 1987. – 3 с.
74. *Муслимов А.П.* Автомат контроля рельефных дефектов изделий. – Бишкек: КыргызНИИНТИ, 1992. 4 с.
75. *Муслимов А.П.* Автомат контроля наружных дефектов изделий типа тел вращения. – Бишкек: КиргизНИИНТИ, 1989. – 4 с.
76. *Муслимов А.П.* Автомат контроля наличия фасок у изделий типа тел вращения. – Бишкек: КиргизНИИНТИ, 1989. 4 с.

А.П. Муслимов

**НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ
И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ**

Учебник

Редактор *И.С. Волоскова*
Компьютерная верстка *М.Р. Фазлыевой*

Подписано в печать 31.05.2022.
Формат 60×84 ¹/₈. Офсетная печать.
Объем 27,25 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 45.

Издательство КРСУ
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44.

Отпечатано в типографии КРСУ
720048, г. Бишкек, ул. Анкара, 2а.



МУСЛИМОВ Аннас Поясович, академик Инженерной Академии Кыргызской Республики, доктор технических наук, профессор, специалист в области автоматизации технологических процессов, научный руководитель и создатель нового направления в этой области: «Теоретические основы, методы построения автоматических систем, устройств контроля и прогнозирования качества продукции».

В научной школе, руководимой им, подготовлено 12 докторов наук и 22 кандидата наук. Его труды признаны в Российской Федерации и в других зарубежных странах.

Является автором более 400 научных трудов, в том числе 50 патентов, 7 книг с грифом МОН КР и 8 монографий.