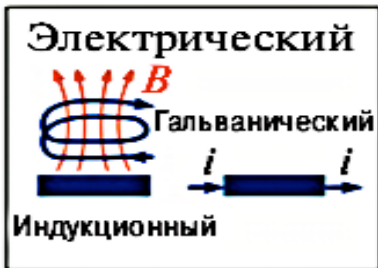


В.А. БЕЛЕВИТИН

Неразрушающий контроль технической диагностики



**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный
гуманитарно-педагогический университет»

**Неразрушающий контроль
технической диагностики**

Учебное пособие

**Челябинск
2024**

УДК 621.8 (021)

ББК 34.44я73

Б 43

Белевитин, В.А. Неразрушающий контроль технической диагностики: учебное пособие / В.А. Белевитин; Министерство просвещения РФ; Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2024. – 304 с. – ISBN 978-5-907869-02-8. – Текст: непосредственный.

Учебное пособие посвящено описанию применяемых при технической диагностике состояния деталей углов механизмов и агрегатов автотранспортных средств разнообразных методов и средств неразрушающего контроля, каждый из которых чувствителен к определённому свойству проверяемых объектов контроля – деталей или материала, позволяет получить сведения о характеристиках объектов неразрушающего контроля. Наибольшее внимание уделено получившим наиболее на практике широкое распространение основанных на научных физических принципах методах неразрушающего контроля: визуально-измерительному, акустическому, магнитному, вихретоковому, проникающих веществ.

Пособие адресовано студентам, обучающимся по программе бакалавриата направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям), профиль «Транспорт».

Рецензенты: М.С. Дмитриев, д-р техн. наук, доцент

К.Н. Семендяев, канд. техн. наук

ISBN 978-5-907869-02-8

© В.А. Белевитин, 2024

© Издательство Южно-Уральского
государственного гуманитарно-
педагогического университета, 2024

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	10
1.1. Визуально-измерительный метод НК	11
1.2. Акустический метод НК	12
1.3. Магнитный метод НК	14
1.4. Вихретоковый метод НК	19
1.5. Средства неразрушающего контроля	20
1.6. Виды и разновидности методов НК	21
Контрольные вопросы	22
2. РЕАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	23
2.1. Визуально-измерительный метод НК	23
2.1.1. <i>Область применения визуально-измерительного метода неразрушающего контроля</i>	23
2.1.2. <i>Инструментарий визуально-измерительного метода неразрушающего контроля</i>	25
Контрольные вопросы	35
2.2. Магнитные методы неразрушающего контроля	36
2.2.1. <i>Физические и технологические основы, задачи магнитных методов НК</i>	36
2.2.2. <i>Магнитопорошковый метод НК</i>	43
2.2.3. <i>Магнитографический метод НК.....</i>	106
2.2.4. <i>Феррозондовый метод НК.....</i>	107
2.2.5. <i>Индукционный метод НК</i>	108
2.2.6. <i>Дополнительные подвиды магнитного метода НК</i>	109
Контрольные вопросы	111
2.3. Методы акустического НК	113
2.3.1. <i>Классификация акустических методов НК</i>	113
2.3.2. <i>Группа методов ультразвукового контроля ...</i>	116

2.3.2.1. Теневой метод акустического НК	117
2.3.2.2. Эхо-метод акустического НК	119
2.3.2.3. Эхо-зеркальный метод акустического НК	119
2.3.2.4. Дельта-метод акустического НК.....	121
2.3.2.5. Реверберационный метод акустического НК	122
2.3.2.6. Импедансный метод акустического НК	123
2.3.2.7. Метод свободных колебаний	125
2.3.2.8. Резонансный метод акустического НК	126
2.3.2.9. Комбинированные методы акустического НК	128
2.3.2.10. Пассивные методы акустического НК	149
2.3.2.11. Способы осуществления акустического контакта.....	152
2.3.2.12. Ультразвуковой инновационный метод НК с использованием фазированных решёток	154
2.3.2.13. Помехи и ложные сигналы при ультразвуковом НК сварных соединений	156
2.4. Вихретоковый метод НК	164
2.4.1. Физические основы вихретокового НК	167
2.4.2. Разновидности и задачи вихретокового НК	168
2.4.3. Особенности вихретокового метода НК	171
2.4.4. Основные функции и настройки вихретокового метода НК	176
2.4.5. Влияние параметров объектов контроля на сигналы вихретоковых дефектоскопов	182
2.4.6. Основные функции и настройки вихретокового дефектоскопа	187
2.4.7. Итоги вихретокового контроля современных дефектоскопов	194

Контрольные вопросы	200
2.5. Метод НК проникающими веществами	202
2.5.1. Общие сведения о капиллярном методе НК	203
2.5.2. Основные физические явления капиллярной дефектоскопии	205
2.5.3. Технология и средства капиллярного НК	214
2.5.4. Чувствительность капиллярного контроля и ее проверка	227
2.5.5. Объекты капиллярного контроля	230
2.5.6. Условное обозначение обнаруженных дефектов при оформлении результатов капиллярного НК	233
2.5.7. Преимущества и недостатки методов капиллярного контроля	235
2.5.8. Перспективы развития капиллярного НК	236
3. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НК	240
3.1. Радиоволновый метод НК	240
3.2. Радиационные методы НК	255
3.2.1. Метод электронной микроскопии (ЭМ)	255
3.2.2. Ионизирующие методы и средства радиационного НК	256
3.3. Тепловые методы НК	
3.3.1. Принципы тепловые методов НК	264
3.3.2. Приборы тепловых методов НК	268
Контрольные вопросы	276
3.4. Оптический метод НК	277
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	296
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	299

ВВЕДЕНИЕ

Свойства изделий механизмов, узлов и агрегатов технических устройств, характеризующие возможность нормально и надёжно выполнять возложенные на него функции, являются *основными*.

Техническое состояние изделия, характеризующееся неспособностью выполнить хотя бы одну из требуемых функций по причинам, зависящим от него или из-за профилактического технического обслуживания, понимается как неисправность и подлежит выявлению в процессе запланированных действий контрольного диагностирования.

В научно-технической литературе техническое состояние изделия определено как совокупность его свойств, которые характеризуются в определённый момент времени при определённых условиях внешней среды значениями параметрических характеристик, установленных технической документацией на объект диагностирования.

Результатом технического диагностирования является оформленная надлежащим образом оценка в определённый момент времени технического состояния объекта (ТСО), совокупность свойств которого подвержена изменениям в процессе производства или эксплуатации технического устройства.

Возможные неисправности в агрегатах технических устройств разделяют на неисправности составляющих узлов и механизмов (или их отдельных функциональных деталей), которые:

– определяются как недопустимые количественные изменения какого-либо параметра (характеристики) узла вследствие необратимых физико-химических изменений или разрушений;

– трактуются как недопустимые количественные изменения функциональных параметров;

– связаны с изменениями структурных связей между их функциональными компонентами.

Проверка *исправности* агрегатов технических устройств производится при их изготовлении и последующих испытаниях, а также при капитальных ремонтах.

К работоспособному состоянию объекта контроля предъявляются только основные требования, характеризующие нормальную его работу в данных условиях, а к исправному состоянию – как основные, так и неосновные. Если объект контроля исправен, то он будет работоспособным. Например, если на автомобиле повреждено лакокрасочное покрытие или помята облицовка, то его используют по назначению в соответствии с требованиями технических условий на такое применение (обеспечение управляемости, проходимости, тягового усилия при нормальном расходе топлива и др.), т.е. машину считают работоспособной. В то же время автомобиль считается неисправным, т.к. не соответствует требованию нормативно-технической документации, хотя и не по основному, а только по внешнему виду. Такое нарушение неисправности называют повреждением.

Проверка работоспособности агрегата и его отдельных функциональных участков обычно осуществляется при периодическом техническом обслуживании машин.

При изготовлении и эксплуатации агрегатов проверяется их исправность, работоспособность и правильность функционирования.

Оценка правильности функционирования агрегата, как правило, производится оператором в процессе выполнения производственного задания, а также техническим персоналом, выполняющим техническое обслуживание машины. Таким образом, проверка правильности функционирования по сравнению с проверкой работоспособности позволяет убедиться только в том, что агрегат правильно функционирует в данном режиме работы в данный момент времени.

Предельное состояние – это состояние объекта контроля (ГОСТ Р 27.002–2015, п. 3.2.7), в котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно. Недопустимость дальнейшей эксплуатации устанавливается на основе оценки рисков, тогда как нецелесообразность или невозможность восстановления может устанавливаться различными способами. При этом наиважнейшую роль в установлении недопустимости дальнейшей эксплуатации объекта контроля принадлежит неразрушающим методам контроля технического состояния изделий механизмов, узлов и агрегатов технических устройств.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ (НК)

Методы неразрушающего контроля основываются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объекта и т.п. Все методы неразрушающего контроля являются косвенными методами. Метода, который бы мог обнаружить самые разнообразные по характеру дефекты, нет. Каждый отдельно взятый метод НК решает ограниченный круг задач технического контроля [1].

Одной из важнейших характеристик любых методов НК является их чувствительность. **Чувствительность** методов НК к выявлению одного и того же по характеру дефекта различна. При определении предельно допустимой погрешности выбранного метода НК следует обязательно учитывать дополнительные погрешности, возникающие от влияющих факторов:

- минимального радиуса кривизны вогнутой и выпуклой поверхностей;
- шероховатости контролируемой поверхности;
- структуры материала;
- геометрических размеров зоны контроля;
- других влияющих факторов, указанных в инструкциях для конкретных приборов.

В зависимости от физических явлений, положенных в основу методов неразрушающего контроля, они подразделяются на девять основных видов:

- визуально-измерительный;
- акустический;
- магнитный;
- вихретоковый;
- проникающими веществами;
- радиоволновый;
- радиационный;
- оптический;
- тепловой;
- электрический.

На практике наиболее широкое распространение нашли первые пять из вышеперечисленных методов, каждый из которых основан на определенном научном принципе.

1.1. Визуально-измерительный метод НК

Визуально-измерительный метод НК – один из самых простейших наиболее дешевых, быстрых и в то же время информативных методов НК. Этот метод подразумевает под собой визуальный осмотр дефектоскопистом контролируемой поверхности детали (заготовки, изделия), фиксацию и измерение дефектов, являясь базовыми и предшествует всем остальным методам дефектоскопии. Метод в обязательном порядке сочетается с другими методами неразрушающего контроля.

Во время проведения визуального контроля дефектоскопист внимательно осматривает поверхности технического устройства (например, с помощью просмотровой лупы с кратностью увеличения от 2 до 7 и/или измерительной лупы с кратностью увеличения от 3 до 10, реже – до 20 крат), выявляет, фиксирует и измеряет размеры дефектов, к которым относятся [2–3]:

- трещины и сколы;
- коррозионные дефекты;
- непровары и несплошности;
- раковины, подрезы, свищи, забоины;
- дефекты от 5 мкр до 12 мм;
- дефекты сварных соединений.

Технические условия на измерительные и просмотровые лупы содержатся в ГОСТ 25706-83.

1.2. Акустический метод НК

Под акустическим видом НК понимают вид, основанный на регистрации параметров упругих колебаний, возбуждаемых и/или возникающих в контролируемом объекте.

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

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

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

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

Акустические методы НК – это методы, основанные на взаимодействии вещества с упругими акустическими волнами с частотой колебаний широчайшего диапазона. Диапазон от 20 Гц до 20 Гц – это слышимый диапазон, то, что слышит человеческое ухо. < 20 Гц – инфразвуковой, там где инфразвук, > 20 кГц – ультразвуковой диапазон, т.е. ультразвук. Акустические методы, использующие частоты колебаний от 20 кГц до 100 МГц, относятся к **ультразвуковым**. Они широко используются в практике контроля технических процессов и готовой продукции.

Ультразвуковой метод НК основан на измерении скорости распространения и поглощения ультразвуковой волны в контролируемой среде. Эта скорость зависит от химической природы среды, от концентрации компонентов среды, а также она зависит от плотности и вязкости среды, но еще и от температуры. А значит, метод может

быть использован для контроля целого ряда свойств – реологических и состава контролируемых систем веществ и материалов.

1.3. Магнитный метод НК

Магнитный метод НК – вид контроля, основанный на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом.

Название магнитного метода НК происходит именно от физических основ детекторов магнитного поля. Каждый вид магнитного метода НК имеет свои разновидности, например, магнитопорошковый метод НК может быть в нескольких исполнениях: порошок может наноситься непосредственно на поверхность исследуемого изделия или располагаться в специальных линзах (рисунок 1.1.1) над поверхностью контролируемого изделия.

Магнитные линзы представляют собой плоский замкнутый сосуд, заполненный магнитной суспензией и имеющий одну прозрачную стенку и дно, выполненное из зеркальной тонкой пленки. Используется такой детектор обычно только в приложенном поле для грубых дефектов.

Принципиальным различием в системах регистрации является наличие или отсутствие каких-либо механических или электрических элементов, позволяющих получить изменение магнитного потока и ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции

$$e = - d\Phi / dt \cdot$$

Такие измерения не проводятся при статических методах регистрации, например, с помощью магнитных сопротивлений, датчиков Холла, магнитного порошка, магнитных диодов и т.п.

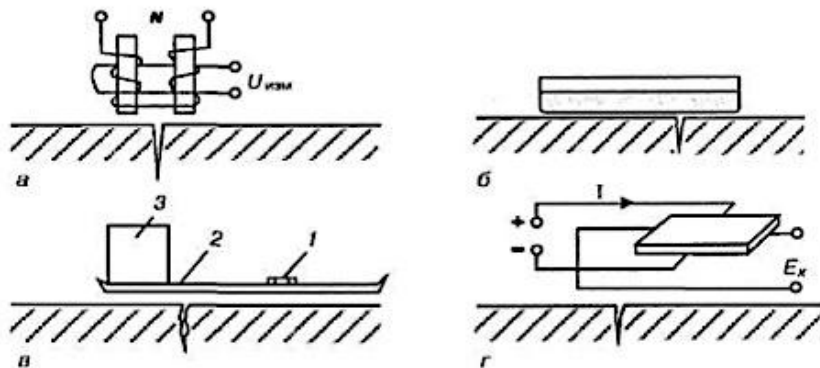


Рисунок 1.1.1 – Некоторые преобразователи для регистрации магнитных полей рассеяния [9]:
а – феррозонд; *б* – магнитная линза; *в* – магнитоакустический преобразователь; *г* – датчик Холла

В дефектоскопии используется и *магнитоакустический метод* (рисунок 1.1.1, в), при котором измерительная катушка 1 наклеивается на пластину 2 из ферромагнетика с сильно развитым магнитострикционным эффектом. В пластине возбуждаются излучателем 3 колебания, которые передаются измерительной катушке. Наводимая ЭДС имеет частоту указанных колебаний и пропорциональна постоянному магнитному полю рассеяния дефекта, которое подмагничивает пластину. Дефект регистрируется обычным ультразвуковым дефектоскопом, с помощью которого возбуждаются колебания в пластине.

Этот метод легко поддается автоматизации, но применим для относительно грубых дефектов. Измерение происходит в зоне локального насыщения пластины с развитым магнитострикционным эффектом, который сильно изменяется от степени подмагничивания. Известно много вариантов подобных датчиков, в конструкции которых имеются постоянные магниты, различным образом расположенные дополнительные катушки. На основе этого метода разработаны и внедрены автоматы для контроля гильз цилиндров дизельных двигателей.

К информативным параметрам в магнитном методе НК относятся: коэрцитивная сила H_c ; намагниченность J ; остаточная магнитная индукция B_r ; магнитная проницаемость μ (начальная или максимальная); параметры петли гистерезиса $B(H)$ или гармонический состав электродвижущей силы (ЭДС) индуктивного преобразователя; параметры скачков Баркгаузена; параметры магнитооптического эффекта, оптомагнитные, магнитопорошковые индикаторные изображения.

Согласно ГОСТ 24450-80 по способу получения первичной информации различают следующие разновидности магнитного метода НК:

- магнитопорошковый (МП);
- феррозондовый (ФЗ);
- индукционный (И);
- магнитографический метод (МГ);
- метод эффекта Холла (ЭХ);
- магниторезисторный (МР);

- магнитополупроводниковый (МПП);
- пондеромоторный (ПМ),

а также не входящие в вышеупомянутый ГОСТ:

- магнитооптический (МО);
- метод магнитной памяти металла (МПМ));
- магнитометрический метод.

К настоящему времени сформировались три основных **области магнитного метода НК:**

- контроль дефектов сплошности в ферромагнитных материалах объектов НК;

- оценка структурного состояния и прочностных характеристик ферромагнитных сталей и сплавов объектов НК;

- определение фазового состава объектов НК

и определены основные области применения **магнитной структуроскопии НК:**

- определение структурного состояния и механических свойств холодного и горячего проката;

- контроль структурного состояния и прочностных характеристик объемно-термически обработанных стальных и чугуновых изделий (отжиг, нормализация, закалка, отпуск и старение);

- оценка напряженного состояния и его изменений в материалах и конструкциях после термической обработки и пластической деформации;

- выявление кристаллографической текстуры, анизотропии механических свойств при штамповке или деформации листового проката;

- контроль структуры, физико-механических свойств и толщины слоев поверхностно-упрочненных изделий различными методами (закалка ТВЧ, химико-термическая обработка, упрочнение плазменными потоками энергии, виброупрочнение, обезуглероживание в стали и т.п.);
- сортировка изделий по марке, качественная оценка содержания основных легирующих элементов.

В промышленном производстве для магнитной структуроскопии уже много десятилетий широко и успешно применяется метод, основанный на измерении коэрцитивной силы H_c металла в точке объекта НК. Приборы, реализующие этот способ контроля, обычно называют **коэрцитиметры или структуроскопы**.

Большое внимание сегодня уделяется вопросам контроля изменений структурного и напряженно-деформированных состояний конструкционных материалов в процессе их эксплуатации. Появилась возможность производить оценку фазового состава конструкционных материалов, определять пористость в металлокерамических изделиях, выявлять пара- и ферромагнитные участки на деталях в конструктивных элементах узлов и механизмов.

В качестве перспективных работ следует отметить задачи НК изменений в процессе эксплуатации фазового состава деталей, работающих в сложных условиях (высокие давления, длительный срок эксплуатации, большой перепад температур, работа в агрессивных средах).

Наибольшее распространение получили:

– **магнитопорошковый метод НК**, основанный на регистрации магнитных полей рассеяния над дефектами с использованием в качестве индикатора ферромагнитного порошка или суспензии;

– **феррозондовый метод НК**, основанный на измерении напряженности магнитного поля, в том числе и магнитных полей рассеяния, возникающих в зоне дефектов, феррозондами;

– **магнитографический метод НК**, заключающийся в намагничивании зоны металла объекта контроля или сварного шва вместе с прижатым к его поверхности эластичной магнитной лентой. Фиксации на магнитоносителе возникающих в местах дефектов полей рассеяния и последующее воспроизведение полученной записи осуществляется считыванием магнитных отпечатков полей дефектов с магнитной ленты в используемых дефектоскопах.

1.4. Вихретоковый метод НК

Вихретоковый метод НК основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля этим полем. Этот метод применяют для НК деталей, изготовленных из электропроводящих материалов. Особенности, присущие вихретоковым методам НК:

– нечувствительность к изменению влажности, давления и загрязненности газовой среды на поверхности объектов контроля непроводящими веществами;

– многопараметровость бесконтактного НК.

Вихретоковые методы НК имеют два основных ограничения: во-первых, их применяют только для контроля электропроводящих изделий; во-вторых, они имеют малую глубину контроля, связанную с особенностями проникновения электромагнитных волн в объект контроля.

1.5. Средства неразрушающего контроля

Неразрушающий контроль осуществляют с помощью средств неразрушающего контроля (СНК): приборов (дефектоскопов, толщиномеров, структуроскопов и т.д.) и установок, а также дефектоскопических веществ и материалов (проникающих и проявляющих жидкостей, магнитных порошков и суспензий, паст и т.д.), стандартных образцов, вспомогательного оборудования.

Дефектоскопы – это приборы и установки, предназначенные для обнаружения дефектов типа несплошностей, разрывов. Практически все дефектоскопы не только выявляют дефекты в изделии, но и определяют с установленной погрешностью его размеры и местонахождение.

Структуроскопы в зависимости от их принципа действия могут определять физико-химические свойства материала, оценивать твердость и прочность материалов, глубину и качество термической обработки, обнаруживать отклонение содержания углерода от номинального значения, рассортировывать изделия по твердости, выявлять неоднородные по структуре области.

1.6. Виды и разновидности методов НК

ГОСТ Р 56542-2019 описывает также следующие методы НК:

- автоэмиссионный, основанный на применении ионизирующего излучения, вызываемого механическими частицами, смесями без их активации;

- акустико-эмиссионный метод, предполагающий оценку характеристик упругих колебаний акустической эмиссии;

- импедансный метод, предполагающий оценку импеданса поверхности;

- конвективный метод неразрушающего контроля, проведение которого предполагает регистрацию потоков тепла, передаваемых объекту посредством конвекции;

- магнитный метод, предполагающий измерение параметров магнитных полей;

- активационный метод, базирующийся на анализе ионизирующих излучений, созданных искусственно и воздействующих на объект контроля;

- метод индуцированного излучения, использующий анализ излучений, генерируемых объектом в результате люминесценции и подобных посторонних воздействий;

- эхо-метод, основанный на анализе волн, полей или потоков частиц, отраженных от дефекта или раздела двух оцениваемых сред;

- метод прошедшего излучения, аналогичный эхо-методу, но при использовании которого анализируется проходимость частиц.

Контрольные вопросы

1. На чём основываются методы и разновидности неразрушающего контроля?
2. Что является одной из важнейших характеристик любых методов НК?
3. Какие погрешности метода неразрушающего контроля следует обязательно учитывать?
4. Влияние каких факторов оказывают дополнительные погрешности методы неразрушающего контроля?
5. Назовите виды методов неразрушающего контроля.
6. Какие физические явления положены в основу методов неразрушающего контроля?
7. Назовите виды методов неразрушающего контроля.
8. Назовите виды методов неразрушающего контроля, получившие наиболее широкое распространение на практике.
9. Какой метод неразрушающего контроля в обязательном порядке предшествует применению любого другого метода неразрушающего контроля на практике?

2. РЕАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

2.1. Визуально-измерительный контроль НК

2.1.1. Область применения визуально-измерительного метода неразрушающего контроля (НК)

Визуально-измерительный контроль (ВИК) – один из основных физических методов НК. Он включает в себя:

- визуальный органолептический контроль изделий, осуществляемый органами зрения (рисунок 2.1.1);
- измерительный контроль изделий, осуществляемый средствами измерений (рисунок 2.1.2).

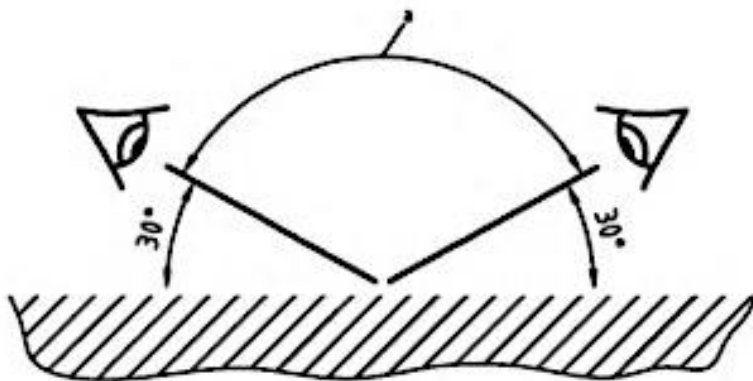


Рисунок 2.1.1 – Доступ для органолептического контроля

ВИК предусмотрен руководящими нормативными техническими документами (НТД) практически во всех отраслях, практических для всех категорий технических изделий.



Рисунок 2.1.2 – Набор для осуществления визуально-измерительного контроля [2]

Ни один другой вид и метод НК не имеет такой широкой области применения. Именно визуально-измерительный контроль предшествует:

- капиллярному;
- вихретоковому;
- магнитопорошковому;
- радиографическому;
- ультразвуковому контролю.

ВИК проводится аттестованными и/или сертифицированными дефектоскопистами и специалистами НК и аттестованными и/или аккредитованными лабораториями неразрушающего контроля (ЛНК).

Визуально-измерительному НК подлежат стыковые, угловые, нахлесточные, тавровые сварные соединения, наплавленные поверхности, основной металл литья, поковок, штамповок, проката – листов, труб, арматуры, балок, квадрата, круга и т.д. Этот метод дефектоскопии активно используется на металлургических производствах, а также на этапе изготовления, строительства, монтажа, эксплуатации, ремонта, реконструкции, технического диагностирования (ТД), технического обследования (ТО).

В зависимости от требований НТД визуальный и измерительный контроль может быть предусмотрен на этапе входного контроля материалов (заготовок, соединяемых деталей), их подготовки под сборку, сборки, во время сварки, а также на этапе НК готовых и/или исправленных сварных соединений.

К задачам ВИК относится измерение геометрических параметров сварных швов, выявление поверхностных дефектов, измерение их размеров (для оценки по нормам отбраковки), а также определение контролепригодности объекта контроля (ОК) к последующему проведению дефектоскопии другими методами.

2.1.2. Инструментарий визуально-измерительного метода неразрушающего контроля

Для ВИК применяется обширный перечень технических средств НК, которые поставляются как по отдельности, так и наборами. К таковым относятся стальные измерительные линейки, измерительные рулетки (рисунок

2.1.1), штангенциркули, шаблоны сварщика (рисунок 2.1.3), просмотрные и измерительные лупы, наборы радиусных шаблонов для определения выпуклых и вогнутых поверхностей, наборы щупов – обоймы из стальных пластин различных толщин (от 0,02 до 1,0 мм) для определения величины зазоров, приспособления для измерения глубины подрезов и смещения кромок (на основе индикаторов часового типа, например, ПСК-10М), угольники, телескопические зеркала и т.д. В сравнении со штангенциркулем шаблоны зачастую более удобны, позволяют выполнять измерения более оперативно.



Рисунок 2.1.3 – Набор шаблонов сварщика с первоначальной калибровкой [4]

Универсальный шаблон сварщика (УШС) ТаріRus (рисунок 2.1.4) разработан для замены многочисленных

шаблонов и приспособлений, используемых при визуаль-но-измерительном контроле качества сварных соедине-ний. Утвержден в качестве средства измерения геометри-ческих параметров сварных соединений и поверхностных дефектов при проведении ВИК, поставляется с поверкой. УШС ТаріRUS позволяет определять большинство геомет-рических параметров сварных соединений и поверхност-ных дефектов: ширина и выпуклость шва, глубина подреза, величина смещения кромок, катет углового шва, угол скоса и зазор и др.

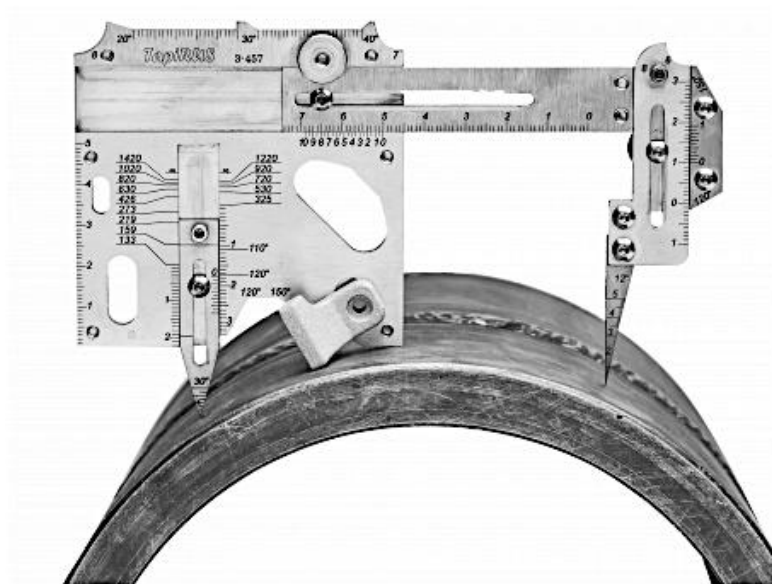


Рисунок 2.1.4 – Универсальный шаблон сварщика (УШС) ТаріRUS [5]

УШС ТаріRUS оснащен опорами, позволяющими од-нозначно позиционировать шаблон на криволинейной по-

верхности. Для проведения измерений с погрешностью 0,1 мм на поверхность УШС TapiRUS нанесены шкалы с нониусом. Содержит ряд калибров для оценки плавности перехода от наплавленного к основному металлу, величины катетов, радиусов и углов разделки кромок. Снабжен щупом со сменной измерительной иглой для определения величины зазоров и высот/впадин.

Разработка, подготовка к производству и изготовление УШС TapiRUS проведены исключительно в цифровом формате.

При производстве TapiRUS применяются новейшие – лазерные и аддитивные технологии:

- станки высокоточной лазерной резки в инертном газе;
- пятиосевые обрабатывающие ЧПУ центры;
- сверхточная цветная лазерная гравировка всего изделия в собранном виде;
- лазерная стереолитография (SLA) – технология послойного синтеза материала из жидкого фотополимера.

Используемые для визуального и измерительного контроля средства измерений (СИ) подлежат метрологическому сопровождению и применяются при наличии действующего свидетельства о поверке или сертификата калибровки.

Визуально-измерительный НК в целом не сводится к простому осмотру. Это довольно строгая проверка геометрии, качества обработки поверхности и прочих параметров по чётким критериям – нормам отбраковки, про-

писанным в руководящих НТД и операционной технологической карте, которая составляет для конкретных объектов и содержит также пошаговое описание всех этапов выполнения ВИК.

В зависимости от конкретных условий проведения визуальный и измерительный контроль может решать следующие задачи:

- подтверждать соответствие изделий и заготовок положениям технических условий, стандартов, проектно-конструкторской документации;

- выявлять деформацию, расслоения, забоины, прожоги, закаты, раковины, подрезы, свищи, наплывы, трещины и иные дефекты, а также следы коррозии и эрозии. Визуально-измерительный НК основного металла изделий позволяет обнаруживать флюсовые, шлаковые, окисные, вольфрамовые включения, завороты корки, прокатные плены, пузыри, рябизну и многое другое. ВИК отливок направлен на то, чтобы не пропустить недоливы, неслитины, обжимы, перекосы, коробление, незаливывы, выломы, зарезы, прорывы металла, пригары, спаи, ужиминны, наросты, засоры, плены, просечки, складчатость, а также горячие, холодные, межкристаллические трещины, усадочную пористость, рыхлоту, вскипы, утяжины, металлические и неметаллические включения и т.д. ВИК подвергаются отливки из чугуна и стали (ГОСТ 19200-80), слитые и литые заготовки (ГОСТ 21014-88), а также готовый металлопрокат – листовой прокат, круг, квадрат, полоса, шестигранник, лента, полоса, трубопрокат.

– проверять заготовки (свариваемые детали) в процессе сборки – их геометрические параметры, смещение кромок, перелом осей, притупление, угол разделки кромок, зазоры, качество прихваток;

– измерять максимальный размер (длину, протяжённость), максимальную ширину, глубину, высоту, диаметр поверхностных дефектов, определение координат их местоположения и расстояний между ними;

– после удаления дефекта убедиться, что выборка дефектного участка и последующая заварка соответствуют нормативным требованиям;

– определять качество нанесения защитных, изоляционных покрытий и т.д.

Кроме того, в процессе визуально-измерительного контроля может выполняться определение контроledоступности объекта для последующего проведения дефектоскопии иными физическими методами. Так, для ВИК чаще всего достаточна шероховатость поверхности не более Ra 12,5 мкм (Rz 80 мкм). Однако для последующего УЗК и МПК, например, шероховатость не должна превышать Ra 6,3 мкм (Rz 40 мкм). Для капиллярного метода может и вообще требоваться Ra 3,2 мкм (Rz 20 мкм). В задачи дефектоскописта ВИК может входить определение пригодности ОК к другим видам и методам НК, предусмотренным в руководствах НТД.

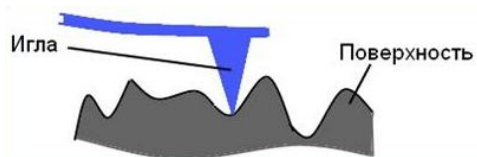
Для полноценного проведения ВИК могут применяться следующие технические средства НК и средства измерения (СИ):

– Аттестованные образцы шероховатости – для оценки шероховатости поверхности методом сравнения. Имеют плоскую, цилиндрическую выпуклую либо цилиндрическую вогнутую форму. Изготавливаются из стали, меди, латуни, титана и других сплавов посредством расточки, шлифования, фрезерования и т.д. Требования к образцам шероховатости для визуального и измерительного контроля содержатся в ГОСТ 9378-93.

– Профилограф или профилометр – прибор, который предназначается для измерения шероховатости контактным методом, означающим, что по исследуемой поверхности перемещается специальная алмазная игла, колеблющаяся от неровностей поверхности (рисунок 2.1.5, а). Такие колебания иглы передаются на датчик, где преобразуются в малые электрические токи, которые, в свою очередь, усиливаются гальванометром и регистрируются. Показания выводятся на дисплей прибора (рисунок 2.1.5, б) и дают представление о характере неровностей исследуемой поверхности – их высоте и глубине. Профилограф или профилометр – приборы, которые предназначаются в качестве инструментария органолептическим способом определения шероховатости и волнистости поверхности. Требования содержатся в ГОСТ 19300-86.

– Люксметр. С его помощью проверяют освещённость контролируемой поверхности перед проведением визуального и измерительного контроля. Требования содержатся в ГОСТ Р 8.865-2013.

– Штангенциркуль с глубиномером – для измерения наружных и внутренних размеров, глубины отверстий и пазов. Штангенциркуль может применяться для измерения большинства геометрических параметров сварных соединений, предусмотренных в РД 03-606-03 и других НТД. В частности, штангенциркуль может использоваться для измерения выпуклости и вогнутости сварных швов, их ширины, смещения кромок, чешуйчатости, межваликовых западений. Требования содержатся в ГОСТ 169-90.



а)



б)

Рисунок 2.1.5 – Профиллометр [6]

– Приспособление для измерения глубины подрезов и смещения кромок. Пример – ПСК-10М ЭЛИТЕСТ. В основе

такого устройства – опорный кронштейн с магнитом для надёжной фиксации на изогнутых и вертикальных поверхностях из ферромагнитных материалов и индикатор часового типа с наружной шкалой (цена деления – 0,01 мм) и внутренней шкалой (цена деления – 1,0 мм). Погрешность измерений всего в 0,01 мм делает его гораздо более подходящим решением для измерения глубины подрезов, смещения кромок, чешуйчатости и иных параметров, нежели УШС-3 или большинство других шаблонов сварщика.

- Фотоаппарат – для наглядной фиксации объекта на момент проведения ВИК.

- Фонарик. Наиболее практичные модели – со светодиодной подсветкой.

- Телескопическое зеркало для визуального контроля труднодоступных мест. Например, обратной стороны сварного шва.

- Металлическая щетка и зубило – для дополнительной зачистки поверхности от брызг металла и прочих загрязнений, хотя вообще подготовка ОК к проведению визуального и измерительного контроля не входит в обязанности дефектоскописта ВИК.

- Термостойкий мел, маркер и т.д.

Для визуально-измерительного контроля применяются также видеоэндоскопы, жёсткие бороскопы и гибкие оптические фиброскопы. Это, по сути, отдельное направление – телеинспекция труднодоступных ниш, отверстий, скрытых механизмов, коммуникаций и пр. Благодаря управляемой артикуляции можно «доставить» зонд с ка-

мерой даже к самым «потайным» местам сложного промышленного оборудования, ограждающих конструкций, инженерных систем и т.д. Современные технические эндоскопы записывают фото и видео в HD-качестве. Файлы сохраняются на SD-карту, плюс доступны для просмотра в режиме реального времени. Для этого многие модели оснащены встроенными дисплеями. Контроль с видеоэндоскопами в полной мере может считаться как визуальным, так и измерительным. При наличии специальной насадки некоторые модели умеют определять расстояние между отдельными элементами изображения, их длину, ширину и диаметр. Обычный ВИК требует свободного доступа к объекту. Как минимум, одностороннего, но в идеале – и с внутренней стороны (например, при обследовании кольцевых сварных соединений). При использовании систем телеинспекции можно произвести осмотр даже самых потайных участков, не демонтируя при этом большое количество устройств и механизмов.

Подготовка персонала – не менее важный аспект защиты от промахов (грубых погрешностей измерений), чем надлежащее метрологическое обеспечение СИ. Так, в соответствии с должностными инструкциями дефектоскопистов ВИК, специалист визуального и измерительного контроля II уровня должен:

– знать физические основы визуально-измерительного НК и руководящие НТД – стандарты, методики, технологические инструкции;

- рационально организовывать рабочее место с соблюдением техники безопасности;
- разбираться в доступных средствах измерения, уметь правильно подбирать технические средства под конкретные задачи;
- знать, как выглядят поверхностные дефекты, наиболее характерные для контролируемого объекта. Для дефектоскопистов и специалистов визуального и измерительного контроля очень важен опыт и «насмотренность», чтобы верно идентифицировать несплошности, не допуская при этом перебраковки и недобраковки;
- уверенно владеть методиками измерений параметров дефектов;
- надлежащим образом оформлять результаты контроля и т.д.

Контрольные вопросы

1. На чём основывается метод визуально-измерительного неразрушающего контроля?
2. Что включает в себя визуально-измерительный метод неразрушающего контроля?
3. Назовите область применения визуально-измерительного метода неразрушающего контроля (НК).
4. Назовите инструментарий визуально-измерительного метода неразрушающего контроля.
5. Назовите область применения основных инструментов визуально-измерительного метода неразрушающего контроля.

6. Чему подлежат используемые для визуального и измерительного контроля средства измерений?

7. Что включает в себя визуально-измерительный метод неразрушающего контроля кроме осмотра объекта контроля?

8. Каким параметрам (критериям, нормам и др.) должны отвечать объекты контроля визуально-измерительного метода?

9. Что относится к задачам визуально-измерительного метода неразрушающего контроля?

10. Что означает определение контролепригодности объекта контроля по результатам визуально-измерительного метода неразрушающего контроля?

11. Что должен знать дефектоскопист (специалист) визуально-измерительного контроля II уровня?

12. Что значит не допускать перебраковки и недобраковки объектов контроля?

2.2. Магнитные методы неразрушающего контроля

2.2.1. *Физические и технологические основы, задачи магнитных методов НК*

Магнитный контроль НК получил широкое распространение благодаря тому, что изделия из сплавов железа (ферромагнитного материала) часто используются для удовлетворения потребностей человека. Именно особые магнитные свойства железа и его сплавов привели к развитию магнитных методов НК. Магнитный НК позволяет в ряде случаев достаточно дешево и надежно выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты в объектах кон-

троля (ОК) и осуществлять другие задачи неразрушающего контроля.

Как самый распространенный при НК ОК (деталей и прочих изделий) магнитопорошковый метод НК основан на возникновении неоднородности магнитного поля над местом дефекта (рисунок 2.2.1) [22].

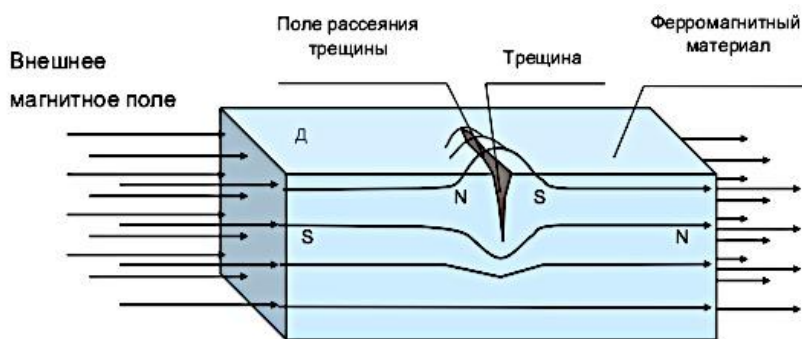


Рисунок 2.2.1 – Поле рассеяния над дефектом [22]

Если в продольное равномерно распределенное магнитное поле поместить образец ферромагнетика с поверхностной трещиной, ориентированной перпендикулярно направлению поля, то произойдет перераспределение магнитного потока как в пределах профиля трещины, так и в окружающей ее зоне. В части сечения образца, прерванного трещиной, плотность линий существенно снизится. Это приведет к тому, что часть линий индукции, расположенных ниже основания трещины, уплотнится. Значительно меньшая часть линий пойдет через воздушный зазор – полость трещины. Оставшаяся часть магнитных линий неизбежно преодолеет трещину снаружи по воздуху, как по

казано на рисунке 2.2.1. Участки на детали, из которых выходят и в которые входят силовые линии, являются магнитными полюсами. Тогда, если на поверхность намагниченного объекта нанести ферромагнитные частицы в виде порошка, эти частицы будут притягиваться к полюсам N и S , как показано на рисунке 2.2.1, причём максимально у вершины трещины (рисунок 2.2.2).

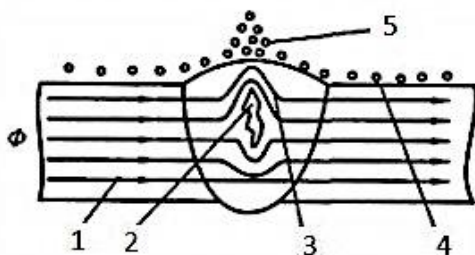


Рисунок 2.2.2 – Схема возникновения неоднородности магнитного поля над местом дефекта [8]:

- 1 – магнитное поле; 2 – дефект; 3 – искажение магнитного поля; 4 – магнитная суспензия; 5 – скопление частиц

Поле рассеяния дефекта максимально, если трещина расположена перпендикулярно силовым линиям магнитного поля. Если угол α между силовыми линиями и трещиной меньше 30° (трещина T_2 на рисунке 2.2.3), то поле дефекта может быть недостаточным для выявления дефекта, т.к. оно пропорционально $\sin(\alpha)$, который для 30° равен 0,5, т.е. начальное искажение поля уменьшается в 2 раза. При $\alpha < 10^\circ$ (трещина T_3 на рисунке 2.2.3) – $\sin(\alpha) < 0,17$ поле ослабевает до в 6 раз и дефекты не выявляются, т.к. силы притяжения будут скорее всего недостаточны для того, чтобы задержать частицы порошка на дефекте.

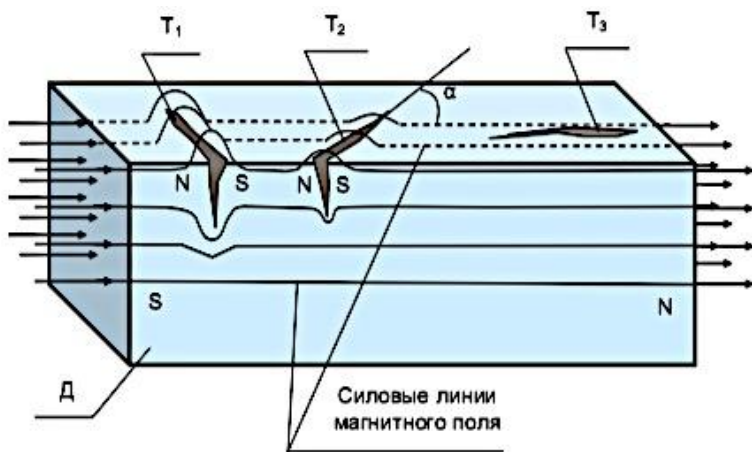


Рисунок 2.2.3 – Поля рассеяния над дефектами различной ориентации относительно силовых линий магнитного поля [22]

Чем больше размеры дефекта, в т.ч. каждого по отдельности, тем большим магнитом будет являться дефект, и значит большее число магнитных частиц он притянет. Чем глубже дефект находится под поверхностью, тем слабее он как магнит, притягивающий частицы магнитного порошка на поверхности. Чем больше размер подповерхностного дефекта, тем более расплывчатым будет пятно магнитного порошка, собираемого над ним. Наибольшая плотность магнитных силовых линий поля рассеяния наблюдается непосредственно над дефектом (трещиной) и уменьшается с удалением от него. Оседание порошка над подповерхностными дефектами менее чёткое и более размытое по сравнению с поверхностными дефектами.

Скопление порошка над дефектом происходит в основном отдельными частицами и короткими цепочками.

Процесс образования цепочек из частиц магнитного порошка называют *магнитной коагуляцией*. Выявление дефектов непосредственно связано с интенсивностью магнитной коагуляции. На интенсивность магнитной коагуляции оказывают влияние следующие факторы:

- концентрация и магнитные характеристики порошка;
- вязкость дисперсионной среды;
- напряженность намагничивающего поля;
- длительность действия намагничивающего поля.

Магнитные методы НК решают следующие задачи:

– магнитопорошковый метод [22] – по выявлению поверхностных и под поверхностных (на глубине до 1,5–2,0 мм) дефектов типа нарушения сплошности материала изделия: трещины, волосовины, расслоения, непроварка стыковых сварных соединений, закатов и т.д. Этим методом можно контролировать изделия любых габаритных размеров и форм, если магнитные свойства материала изделия (относительная максимальная магнитная проницаемость $\mu \geq 40$ Гн/м) позволяют намагничивать его до степени, достаточной для создания поля рассеяния дефекта, способного притянуть частицы ферромагнитного порошка;

– феррозондовый метод контроля, используя принцип регистрации изменений нормальной или тангенциальной составляющей магнитного поля при перемещении преобразователя над дефектом в намагниченной детали, применяется для выявления поверхностных и подповерхностных (глубиной до 10 мм) дефектов типа нарушения сплош-

ности материала: волосовины, трещин, раковин, закатов, плен и т.п., а также для выявления дефектов типа нарушения сплошности сварных соединений и для контроля качества структуры и геометрических размеров изделий, используется для определения степени размагниченности изделий после магнитного контроля. Физическая сущность магнитного феррозондового контроля состоит в намагничивании изделий из ферромагнитных материалов и сканировании контролируемых поверхностей с помощью специальных преобразователей – феррозондов, которые фиксируют отклонения магнитных полей над локальными участками с дефектами. Катушки феррозондов работают по принципу электромагнитной индукции. При наличии дефекта силовые линии магнитного поля ведут себя над феррозондом так, как указано на рисунке 2.2.4.

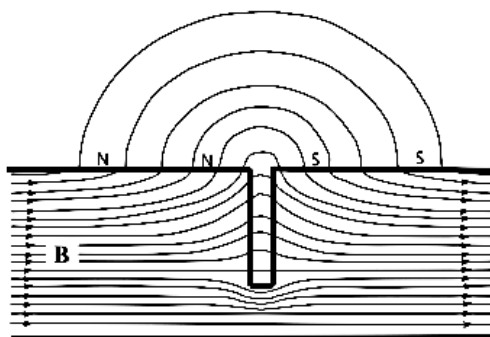


Рисунок 2.2.4 – Силовые линии над дефектом в намагниченном объекте контроля [22]

Этот метод можно применять на изделиях любых размеров и форм, если отношение их длины к наибольшему

размеру в поперечном направлении и их магнитные свойства дают возможность намагничивания до степени, достаточной для создания магнитного поля рассеяния дефекта, обнаруживаемого с помощью преобразователя. В случае использования преобразователя-градиентомера (который так называется потому, что измеряет разность значений индукции магнитного поля в двух параллельно расположенных рядом катушках) при обнаружении дефектов (рисунок 2.2.5) повышается достоверность выявления значений градиента магнитного поля в области дефекта;

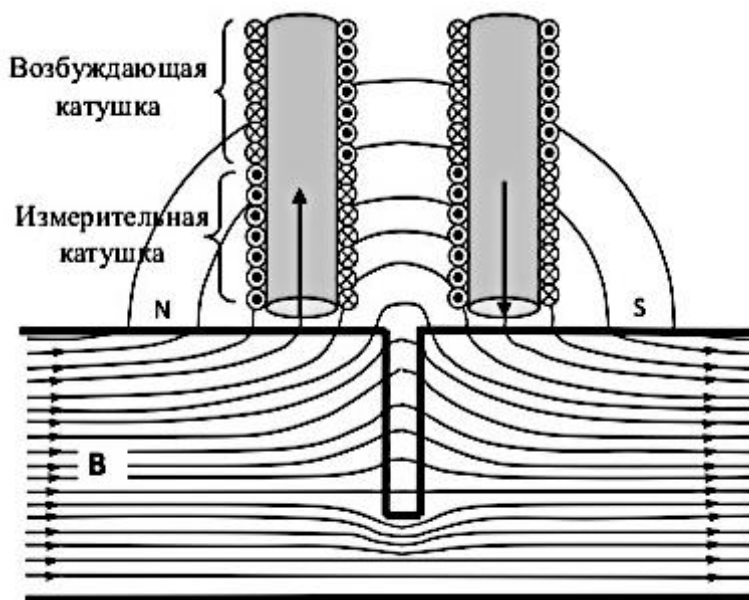


Рисунок 2.2.5 – Феррозондовый преобразователь [22]

– магнитографическим методом контроля, использующим, как и феррозондовый метод контроля, принцип регистрации изменений нормальной или тангенциальной

составляющей магнитного поля при перемещении преобразователя над дефектом в намагниченной детали, выявляют дефекты типа нарушений сплошности материала изделий, в основном при контроле стыковых сварных соединений из ферромагнитных материалов при их толщине от 1 до 18 мм.

2.2.2. Магнитопорошковый метод НК

Самым распространённым и надёжным методом магнитной дефектоскопии является **магнитопорошковый метод НК** – основанный на возникновении неоднородности магнитного поля над местом дефекта [22]. Магнитопорошковый метод НК основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами (см. рисунок 2.2.2) в контролируемом изделии при его намагничивании с помощью ферромагнитных частиц (магнитного порошка, аэрозолей и т.п.), который находится во взвешенном состоянии в дисперсионной среде или воздухе. При этом использовании метода магнитопорошкового НК намагниченную деталь посыпают магнитным порошком (сухой метод) или поливают магнитной суспензией (мокрый метод). Частицы порошка, попавшие в зоны магнитных полей рассеяния, оседают на поверхности деталей вблизи мест расположения дефектов, т.к. на магнитную частицу в неоднородном магнитном поле дефекта действует сила, стремящаяся затянуть ее в места наибольшей концентрации силовых линий и приблизить к дефекту. Под действием силы, таким образом, происходит перемещение час-

тицы и образование валика порошка над дефектом. В итоге, эффективность выявления дефекта при магнитопорошковым контроле находится в тесной связи с интенсивностью поля рассеяния и его градиентом, а также зависит от магнитных свойств и размеров ферромагнитных частиц используемого порошка. Ширина полосы, по которой происходит оседание порошка, значительно больше ширины «раскрытия» дефекта, поэтому невидимые до этого дефекты фиксируют по осевшему около них порошку даже невооруженным глазом.

При проведении магнитопорошкового контроля выполняются следующие операции [22]:

- подготовка ОК (детали и пр. изделия) к контролю;
- подготовка средств контроля;
- намагничивание детали или деталей;
- нанесение магнитного индикатора на контролируемую поверхность;
- осмотр контролируемой поверхности и расшифровка магнитной индикации с последующим измерением размеров дефекта;
- при необходимости уточнения результатов контроля выполнение дополнительных операций по идентификации дефекта;
- размагничивание деталей (если требуется);
- оформление результатов контроля в журналы или в виде протоколов.

В зависимости от последовательности этих операций магнитопорошковый НК разделяется на два способа:

- способ приложенного поля (СПП);
- способ остаточной намагниченности (СОН).

Сущность способа приложенного поля (СПП) заключается в том, что операции намагничивания, нанесения магнитного порошка и основную часть осмотра выполняют одновременно, т.е. в приложенном поле.

Способ остаточной намагниченности (СОН) описывает способ намагничивания детали с последующим нанесением магнитных частиц после снятия намагничивающего поля. В этом случае для образования индикаций на поверхности изделия используется только остаточное магнитное поле намагниченной детали.

Способ СОН имеет следующие преимущества перед способом СПП:

- возможность установки детали в любое положение для выбора лучшего освещения и удобного осмотра, так как деталь не надо удерживать в поле намагничивающего устройства, особенно ценно это преимущество при контроле деталей сложной формы, когда надо заглядывать в пазы, канавки и т. п.;

- нанесение суспензии как путем полива, так и окунанием в ванне с суспензией одновременно ряда деталей не только непосредственно за операцией намагничивания, но и спустя несколько часов;

- почти всегда способ СОН имеет большую производительность труда, так как выполнение однотипных операций, например, сначала намагничивание 100 деталей подряд, а затем полив сразу их всех, потом последовательный

осмотр, сокращает рабочее время по сравнению с работой, когда надо выполнять каждый раз другую операцию;

- меньшую вероятность появления ложных отложений порошка в местах грубой обработки поверхности, наклепа, по рискам и т. п.;

- улучшение безопасности труда, т.к. дефектоскопист даже случайно не может попасть в магнитное поле включенного намагничивающего устройства или коснуться открытых частей токопровода намагничивающего устройства (некоторые устройства имеют в силу технических особенностей открытые части, по которым протекает электрический ток).

СПП имеет только одно важное преимущество – этот способ имеет высокую чувствительность. При этом индикаторные рисунки дефектов образуются в процессе намагничивания. При использовании СПП сначала прекращают нанесение индикатора на объект, затем – намагничивание. Осмотр контролируемой поверхности проводят при намагничивании и (или) после его прекращения. При контроле СПП достигаются высокие значения намагниченности деталей, вплоть до насыщения, и, следовательно, тангенциальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния над дефектами. Это повышает выявляемость дефектов данным способом, но не всегда, т.к. даже при средней шероховатости поверхности и наличии эксплуатационных рисков, вмятин и т. п. могут появляться дополнительные ложные осадения магнитного

порошка в этих местах, осложняющие расшифровку результатов контроля.

Поэтому при прочих равных условиях предпочтение следует отдать магнитному способу контроля СОН.

Способ остаточной намагниченности СОН, как правило, проводят в следующих случаях:

- изделие должно быть изготовлено из магнитотвердого материала с $B_r > 0,53$, T_l и $H_c > 9,5$ А/см, чтобы остаточная намагниченность была достаточно большой, чтобы на поверхностных дефектах образовывались полюса, притягивающие частицы магнитного порошка;

- изделие должно быть достаточно простой формы, без галтельных переходов, пазов, резьбы, которые сильно ослабляют и рассеивают магнитное поле и остаточное поле, и так не сильно большое;

- намагничивающее устройство позволяет создать поле напряженностью близкой к H_s ;

- на контролируемой детали не должно быть немагнитного покрытия, например, краски, лака, эмали и т. п.;

- задачей контроля должно быть выявление только выходящих на поверхность дефектов, для выявления подповерхностных дефектов нужно только сильное приложенное магнитное поле.

Для правильного выбора способа намагничивания следует выполнить следующие действия:

- 1) определяют марку материала проверяемого объекта, используя техническую документацию на его изготовление;

2) по справочникам оценивать остаточную намагниченность и коэрцитивную силу;

3) исходя из положения точки с координатами H_c и B_r на рисунке 2.2.6 делают заключение о возможности применения того или иного способа контроля, руководствуясь следующим: если на графике точка (H_c, B_r) расположена выше кривой, то возможен контроль объекта как СОН, так и СПП, если (H_c, B_r) расположена ниже кривой, то рекомендуется контроль СПП.

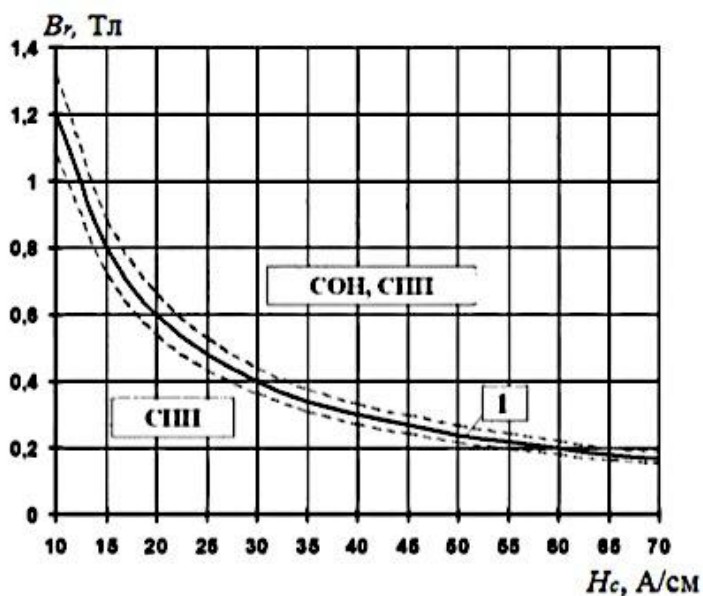


Рисунок 2.2.6 – Феррозондовый преобразователь [22]

При отсутствии сведений о коэрцитивной силе H_c и остаточной индукции B_r материала изделия деталь контролируют СПП.

Подготовка деталей к НК феррозондовым методом заключается в следующих операциях:

- очистка детали от поверхностного немагнитного защитного покрытия, загрязнений, масла, смазки и т. п.;
- обезжиривание поверхности – для исключения залипания магнитных частиц к детали, иначе подвижность частиц в области жирных пятен будет понижена, а вслед за ней и выявляемость дефектов;
- зачистка от заусенцев, рисок, ржавчины, забоин для обеспечения равномерной шероховатости поверхности для особо ответственных деталей наждачной бумагой и шлифовальной машинкой;
- расположение детали на участок намагничивания.

Основное правило при очистке поверхности от немагнитных покрытий связано с тем, что чем дальше будут магнитные частицы находиться от детали, тем слабее будет магнитное поле и сила притяжения частиц к дефекту. Так, по ГОСТ Р 56512-2015 без ущерба для чувствительности магнитопорошкового контроля допускается немагнитное покрытие толщиной до 50 мкм, а при толщине более 80 и до 200 мкм необходимо использовать в качестве индикатора сухой взвешенный в воздухе порошок и для оценки работоспособности магнитопорошковой системы использовать специализированные образцы с дефектами, имеющими такое же покрытие.

Для протирки можно использовать современные суспензии на основе порошков типа МИНК, ДИАГМА и пр., которые содержат мыльные компоненты, смывающие

жирные пятна и повышающие смачиваемость поверхности подвергаемой НК детали.

Наличие любых неровностей, а особенно локальных типа рисок, заусениц и т. п. является естественными препятствиями на пути магнитного порошка к потенциальному дефекту, и чем меньше их будет, тем лучше проявятся дефекты, особенно находящиеся рядом с ними. Поэтому те детали, которые допускается шлифовать – лучше зачистить от такого рода неровностей.

Подвергаемую НК деталь следует установить так, чтобы обеспечить стекание суспензии по как можно большей поверхности, особенно это касается деталей с плоской контролируемой поверхностью, иначе суспензия будет застаиваться на детали и образовывать равномерный слой магнитного индикатора, затрудняющего осмотр. Поэтому (особенно если суспензию наносят поливом) плоские детали лучше располагать под небольшим продольным наклоном ($\approx 10^\circ$), т.е. один конец подложки длиной 1 м должен возвышаться над другим на 17 см), так небольшое количество суспензии будет стекать по всей поверхности равномерно, удаётся добиваться определенной экономии суспензии и отсутствия фона, затрудняющего осмотр.

Если детали короткие, когда отношение длины к наибольшей поперечной стороне или диаметру детали менее 5, то детали нужно укладывать в цепочки такой длины, чтобы их длина стала больше ширины. Это происходит из-за того, что на краях изделия тангенциальная составляющая напряженности поля, направленная вдоль де-

тали H убывает очень быстро, и чем короче деталь, тем быстрее она убывает, вместе с тем растет значение нормальной составляющей напряженности магнитного поля. В этом случае, полюса торцов детали будут гораздо более мощным магнитом для частиц, которые к этим полюсам и будут притягиваться, а не к дефектам, которые необходимо обнаружить (рисунок 2.2.7).

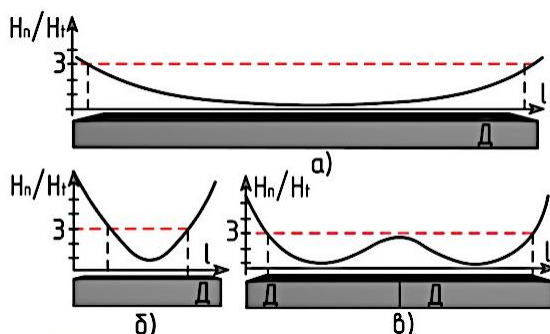


Рисунок 2.2.7 – Изменение соотношения составляющих магнитного поля на поверхности ОК, составляемых в цепочки [22]

При составлении подвергаемых НК деталей в цепочки одинаковыми торцами друг к другу, когда их общая длина становится больше, чем в 5 раз по сравнению с шириной, добиваются повышения тангенциальной составляющей и уменьшения нормальной, что позволяет более эффективно находить дефекты на таких деталях.

Подготовка средств контроля предпочтительнее в постоянном режиме, которую надо проводить перед контролем каждой детали или серии деталей. При этом необходимо:

– поверить целостность заземления, корпусов приборов и соединительных кабелей, резинового коврика и диэлектрических перчаток – чтобы исключить возможность поражения электрическим током дефектоскописта;

– включить блок питания намагничивающего устройства в положение без ОК и любых ферромагнитных предметов в поле намагничивающего устройства и убедиться в том, что устройство выдает требуемое значение намагничивающего тока на встроеном амперметре;

– стандартный образец (тест-образец, контрольный образец) с искусственным дефектом установить в положение контроля;

– подготовить магнитный индикатор;

– намагнитить деталь или детали, нанести индикатор и определить качество собираемого валика над дефектом, сравнив его с дефектограммой;

– удалить остатки индикатора с поверхности образца (иначе невидимый глазу дефект на кромках начнет постепенно разрушаться под воздействием коррозии, а значит со временем станет виден и придет в негодность, так как невидимость при визуальном осмотре невооруженным глазом дефекта одно из главных условий его пригодности), а сам образец убрать на место хранения.

Вместо образца с искусственным дефектом допускается использовать образец в виде реальной детали с естественной трещиной, но в этом случае необходимо поверить суспензию с помощью отраслевых стандартных образцов на устройстве МОН-721 или МФ-10СП или на анало-

гичном приборе проверки качества магнитного индикатора. Суспензию перед каждым нанесением на деталь необходимо перемешивать деревянной мешалкой, которая не сохраняет статического электрического заряда.

Способ, схему и средство намагничивания, а также вид намагничивающего поля выбирают в зависимости от геометрической формы и размеров ОК, материала и толщины немагнитного защитного (естественного) покрытия, а также от типа, местоположения и направления подлежащих выявлению дефектов. Дефекты выявляются значительно хуже или могут не выявляться, если магнитное поле направлено к плоскости дефекта под углом менее 30° . Если ориентация дефектов неизвестна, то детали простой формы намагничивают в двух направлениях, сложной – в нескольких.

Так как магнитное поле рассеяния дефекта формируется только тангенциальной составляющей H_T вектора напряженности намагничивающего поля, то основной задачей при намагничивании кроме выбора направления является обеспечение минимально допустимого значения напряженности магнитного поля на контролируемом участке. Выявляемость дефектов также ухудшается, если нормальная составляющая H_n вектора напряженности намагничивающего поля превышает тангенциальную более чем в три раза. Для надежного выявления дефектов на контролируемой поверхности детали при намагничивании должно выполняться условие: $H_n/H_T \leq 3$.

Существует три способа намагничивания:

– полюсное (продольное); циркулярное и комбинированное.

Полюсное намагничивание – способ намагничивания, при котором магнитные силовые линии часть пути проходят по детали, а часть – по воздуху. Этот способ намагничивания, чаще всего, служит для выявления поперечных дефектов относительно продольной оси детали. Именно поэтому часто полюсное намагничивание называют продольным. А поперек детали можно эффективно намагничивать далеко не все детали. Реализовать полюсной способ намагничивания можно по одной из четырех схем, представленных на рисунке 2.2.8.

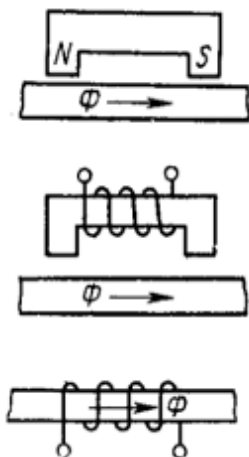


Рисунок 2.2.8 – Графическая схема полюсного намагничивания контролируемых изделий [7]

Средства намагничивания у полюсного (продольного) намагничивания контролируемых изделий – постоян-

ным магнитом (рисунок 2.2.8, а), электромагнитом (рисунок 2.2.8, б) и соленоидом (рисунок 2.2.8., в).

Полюсное намагничивание обычно получают помещением детали в соленоид, часто в качестве соленоида используется гибкий кабель, обертываемый вокруг участка детали, а также постоянные магниты и электромагниты. Средство и схему полюсного намагничивания выбирают исходя из величины и вида намагничивающего поля.

Самым простым средством НК является **постоянный магнит**, изготовленный из магнитотвердого материала, имеющего высокий уровень остаточной намагниченности. Простота этого средства в том, что не требуется питания электрическим током, а, следовательно, постоянный магнит безопасен. При намагничивании постоянным магнитом (рисунок 2.2.9) хорошо выявляются дефекты, располагающиеся перпендикулярно линии, соединяющей магнитные полюса. Постоянный магнит хорошо использовать для намагничивания мелких или тонких деталей, а также отдельных участков, в т.ч. в вертикальном положении.



Рисунок 2.2.9 – Намагничивающее устройство на постоянных магнитах [22]

Вместе с тем постоянные магниты способны навести постоянный и неизменный магнитный поток, а это значит, что при увеличении площади сечения магнитная индукция у поверхности будет уменьшаться обратно пропорционально увеличению площади поперечного сечения, по которому проходит магнитный поток в детали. Поэтому применяется постоянный магнит не так часто. Другими недостатками постоянного магнита являются:

- постоянный магнит может обеспечить только постоянное магнитное поле, которое равномерно распределяется по всей толщине детали, поэтому он слабее выявляет поверхностные дефекты, по сравнению с устройствами наводящими переменное магнитное поле;

- слишком толстые детали, толщиной более 10–15 мм большинством современных постоянных магнитов намагничиваются уже недостаточно;

- участки около полюсов (на расстоянии около 3 см) обладают повышенной нормальной составляющей поля, которая фактически не дает контролировать эти участки;

- уменьшая расстояние между полюсами мы практически не можем изменить напряженность магнитного поля на поверхности, так как она зависит в основном от площади сечения детали.

Похожим на постоянный магнит является электромагнит в намагничивающем устройстве, отличающемся тем, что магнитный поток создается в магнитопроводе катушкой, по которой течет электрический ток. Несомнен-

ными достоинствами электромагнита по сравнению с постоянным магнитом являются:

- возможность реализовать ток любого вида (постоянный, переменный, выпрямленный, импульсный), но для выявления поверхностных усталостных трещин предпочтительнее переменный ток;

- в большинстве электромагнитов можно регулировать ток, а значит и напряженность поля над деталью в обеспечение качества контакта, в т.ч. над деталями с криволинейными поверхностями. В комплекте электромагнита часто поставляют контактные съемные насадки.

С помощью электромагнита удобно намагничивать отдельные участки деталей, хотя встречаются и специализированные стационарные электромагниты, детали в которые надо вставлять. Но наиболее распространенным на вагоноремонтных предприятиях является электромагнит МЭД-40/120 (рисунок 2.2.10). С помощью электромагнита удобно контролировать отдельные участки крупных деталей или дополнительно контролировать участки, на которых результаты контроля другими методами подвергаются сомнению.

Наиболее распространенным средством реализации полюсного намагничивания при магнитопорошковом контроле на ремонтных предприятиях являются соленоиды, питаемые от сети 220 В или 380 В. Достоинства этих намагничивающих устройств связаны с возможностью обеспечения на поверхности деталей очень высоких значений напряженности магнитного поля (иногда свыше 100

А/см) и достаточно большой зоной достаточной намагниченности – до 350 мм. Другим достоинством соленоида является возможность контроля как СОН, так и СПП, а также благодаря блоку питания применение любого вида тока и соответственно магнитного поля (постоянного, переменного, импульсного и т. п.).



Рисунок 2.2.10 – Электромагнит МЭД-40/120 [22]:

- 1 – электромагнит; 2 – блок питания; 3 – кабель, соединяющий электромагнит 1 с блоком питания 2;
- 4 – насадок для контроля угловых участков

Недостатком их использования являются ограничения поперечных размеров ОК, которые можно контролировать этим устройством, при этом максимальный диаметр или ширина ОК должна быть меньше на несколько сантиметров (4–5 см), чем внутренний диаметр соленоида. Кроме того, если диаметр детали ОК большой, то сложно поворачивать соленоид под углом так, чтобы продольные

дефекты (если они вероятны в детали) оказывались под углом 30° и более к силовым линиям магнитного поля.

Основные правила намагничивания ОК соленоидом следующие:

- если детали достаточно короткие, то их надо выкладывать в цепочки, длина которых должна находиться в пределах зоны достаточной намагниченности, а соленоид устанавливать посередине над деталями;

- чем ближе к центральной оси соленооида находится поверхность НК длиной детали (рисунок 2.2.11), тем больше будет зона достаточной намагниченности;

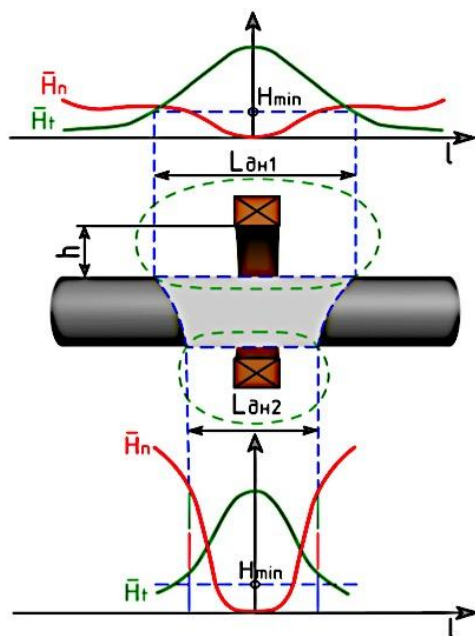


Рисунок 2.2.11 – Распределение напряженности магнитного поля на поверхности детали, смещенной относительно оси намагничивающего ее соленооида [22]

– намагничивать протяженные детали (в т.ч. с галтельными переходами) соленоидом можно двумя вариантами: а) равномерно перемещая соленоид над деталью со скоростью ≤ 150 мм, успевать наносить индикатор перед соленоидом, б) перемещая соленоид на расстояние примерно 0,8 зоны достаточной намагниченности, останавливать и наносить индикатор вокруг соленоида в пределах зоны достаточной намагниченности;

– помнить, что при контроле конусных поверхностей деталей и при приближении к торцам величина зоны достаточной намагниченности немного уменьшается, а вот насколько сильно, для каждого намагничивающего соленоида следует определять экспериментально измерителями напряженности магнитного поля;

– при намагничивании протяженных деталей (в т.ч. с галтельными переходами), когда зона достаточной намагниченности меньше длины контролируемого участка, намагничивать деталь в приложенном поле лучше всего от торца, заводя торец детали на 30–50 мм внутрь соленоида (рисунок 2.2.12, а).

Соленоиды бывают различного вида и назначения. Например, соленоид МД- 12ПЭ (эксцентричный) отличается тем, что намагничивает деталь только с одной стороны, в отличие от других соленоидов и, соответственно, наносить индикатор и осматривать деталь надо только с той стороны, которая намагничивает (рисунок 2.2.13, а). Другой тип оригинального соленоида – седлообразное намагничивающее устройство (рисунок 2.2.13, б), представляет

собой соленоид изогнутый так, что его можно подводить к крупногабаритной детали сбоку и намагничивать.

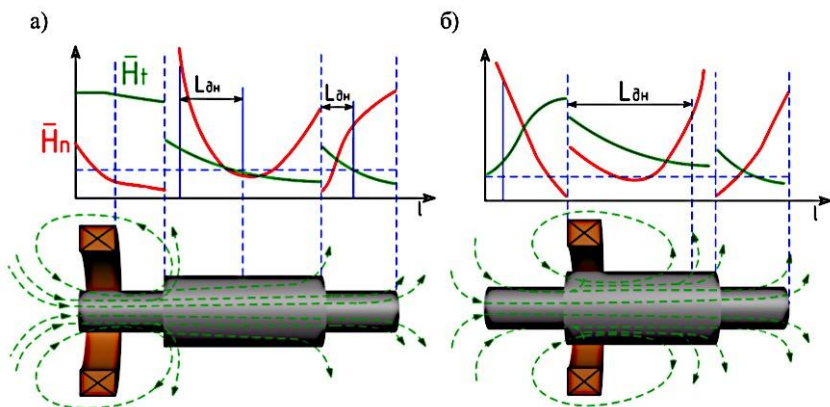


Рисунок 2.2.12 – Намагничивание протяженных деталей и деталей с изменением площади сечения [22]:

а, б – расположение соленоида в начальный момент намагничивания и после перемещения на величину зоны достаточной намагнитченности соответственно

а)



Рисунок 2.2.13 – Соленоиды [22]:

а) МД-12ПЭ, б) МД-12ПС

Если перегнуть соленоид, то получится, что ток потечет по обеим половинкам навстречу друг другу, от чего в середине такого устройства велика нормальная состав-

ляющая поля и в середине на деталь не следует наносить индикатор и осматривать, а делать это только с обеих внешних сторон седлообразного намагничивающего устройства.

Циркулярное намагничивание – это намагничивание, при котором магнитный поток весь свой путь проходит по проверяемой детали (замыкается в детали или из детали не выходит), явные полюса у детали не образуются. Средства намагничивания у циркулярного намагничивания контролируемых изделий – пропусканием тока по детали (рисунок 2.2.14, а), с помощью провода с током, помещаемого в отверстие детали (рисунок 2.2.14, б), с помощью контактов, устанавливаемых на деталь (рисунок 2.2.14, в) и индуцированием тока в детали (рисунок 2.2.14, г).

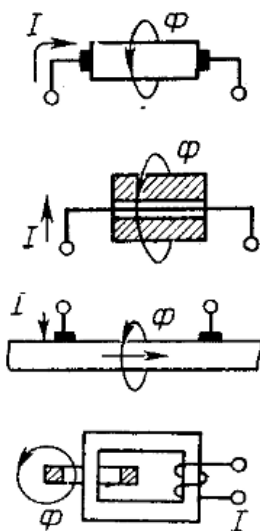


Рисунок 2.2.3 – Графическая схема циркулярного намагничивания контролируемых изделий [7]

Циркулярное намагничивание применяется для выявления продольных и наклонных дефектов (рисунок 2.2.15).

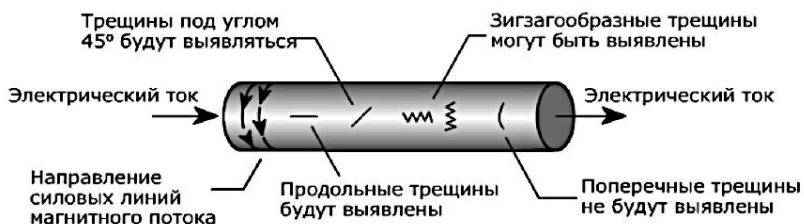


Рисунок 2.2.15 – Схема намагничивания цилиндрической детали путём пропускания по ней тока [22]

Циркулярное магнитное поле представляет собой магнитные силовые линии, которые проходят по окружностям по периметру детали. Циркулярное намагничивание можно осуществить путём пропускания тока по детали, по участку детали, пропускания тока по проводнику, помещённому внутрь изделия, с помощью тороидальной обмотки и с помощью индукционного намагничивания.

В учебном пособии Боброва А.Л., Лесных Е.В. Основы магнитного неразрушающего контроля [22] приведены технические приёмы циркулярного намагничивания с расчётами напряжённости магнитного поля пропусканием тока по сплошной цилиндрической детали, по детали с отверстием, по участку детали с помощью контактных электродов (рисунок 2.2.16), пропусканием тока по центральному проводнику, с применением тороидальной обмотки (рисунок 2.2.17), включая описание наилучших технологических приёмов.

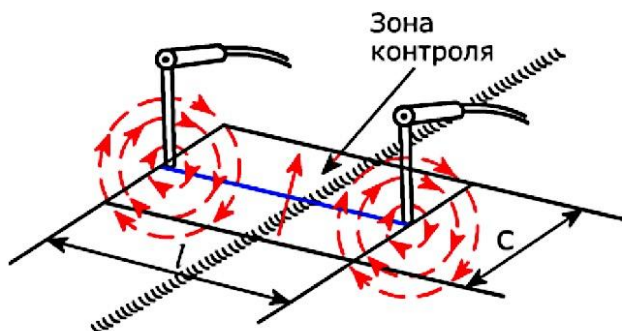


Рисунок 2.2.16 – Магнитные силовые линии и зона контроля при намагничивании с помощью контактных наконечников [22]

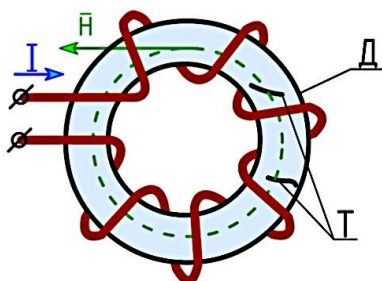


Рисунок 2.2.17 – Циркулярное намагничивание детали с помощью тороидальной обмоткой [22]

Циркулярный способ в магнитопорошковом методе применяют для выявления продольных дефектов типа трещин, непроваров, вытянутых шлаковых включений. Его осуществляют при пропускании напряжения по контролируемой детали или через проводник, помещенный в отверстие данного изделия. Наиболее эффективно этот способ работает при контроле цилиндрических элементов.

Комбинированное намагничивание достигается в результате одновременного продольного и циркулярного намагничивания и использования для него токов одного вида или токов разного вида с соответствующими моментами включения или с изменением их значений и направления. Средства намагничивания у комбинированного способа – пропусканием тока по ОК и с помощью электромагнита (рисунок 2.2.18, а), пропусканием двух (или более) сдвинутых по фазе токов по ОК во взаимно перпендикулярных направлениях (рисунок 2.2.18, б) и индуцированием тока в детали и током, проходящим по проводнику, помещаемому в отверстие ОК (рисунок 2.2.18, в).

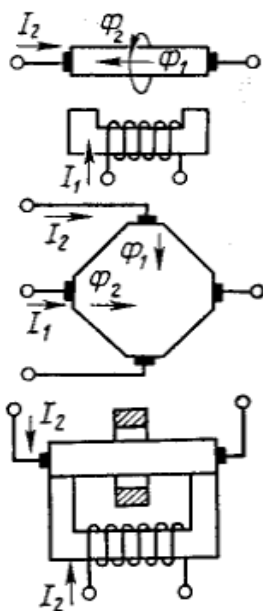


Рисунок 2.2.18 – Графическая схема комбинированного намагничивания контролируемых изделий [7]

В случае комбинированного намагничивания, позволяющего выявлять трещины, направленные под разными углами к оси контролируемой детали, возникает результирующее поле, величина которого зависит от параметров каждого из полей. Необходимо, чтобы суммарный вектор намагниченности поворачивался относительно оси детали в пределах 90° .

Комбинированный способ осуществляется только в приложенном магнитном поле. Циркулярные полюсные виды можно применять как в приложенном магнитном поле, так и на остаточной намагниченности. Примером комбинированного вида может быть намагничивание трубы соленоидом и пропускание тока через проводник, проходящий внутри трубы. В результате два поля складываются в результирующее, силовые линии которого направлены по винтовым линиям. Такое поле проходит через все части объекта под различными углами направления, что дает возможность повысить выявляемость дефектов, ориентированных различным образом.

Магнитный поток в бездефектной части изделия не меняет своего направления. Если же на пути его встречаются участки с пониженной магнитной проницаемостью, например, трещины, неметаллические включения и т.д., то при этом возникают местные магнитные полюсы (N и S) и, как следствие, магнитное поле над дефектом. Металлические частицы, попавшие в неоднородное магнитное поле, возникшее над повреждением, притягиваются друг к другу и ориентируются по магнитным силовым линиям поля, об-

разуют цепочные структуры, выявляемые при осмотре контролируемого объекта (детали и пр. изделий). Намагничивание подвергаемых магнитопорошковому НК объектов, обработка их порошком (чаще суспензией), а также последующее размагничивание производятся с помощью магнитных дефектоскопов, принцип действия которых основан на регистрации магнитных полей рассеяния дефектов. Регистрация полей рассеяния может осуществляться как с помощью магнитного порошка, так и магнитной ленты, феррозондов, преобразователей Холла, индукционных и магниторезисторных преобразователей.

Магнитопорошковый метод НК в целом применяют для контроля изделий, деталей, сварных соединений конструкций из ферромагнитных материалов с относительной магнитной проницаемостью не менее 40 с целью выявления невидимых невооруженным глазом поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности типа трещин, непроваров. Наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты: поверхностные и подповерхностные трещины (деформационные, закалочные, усталостные и т.п.), шлаковые включения, непровары, несплавления, поры, максимальный размер (сечения более 2–3 мм² на глубине 5–6 мм под поверхностью) которых ориентирован под прямым или близким к нему углом относительно направления магнитного потока. Дефекты округлой формы (поры, шлаковые включения, раковины) не могут создавать достаточно потока рассеяния и, как правило, при контроле обнаруживаются плохо. Плоские дефекты могут быть выявлены в

случае, если они ориентированы к поверхности детали под углом более 20° (максимум чувствительности под углом 90°). С увеличением глубины залегания дефектов уменьшается скорость скопления магнитного порошка, что затрудняет выявление брака и определение их характера.

Востребованность и распространенность магнитопорошкового метода НК обусловлена несколькими факторами, в том числе:

- возможностью выявить микроскопические трещины, усталость сталей, прочие дефекты, не всегда поддающиеся визуальной диагностике – слабо видимые дефекты, раскрытие которых составляет $0,001$ мм; глубина – $0,01$ мм; протяженность – $0,5$ мм и более;

- возможностью проведения на объектах, покрытых немагнитным материалом (лакокрасочные материалы, цинк, медь, кадмий и пр.). Правда, при условии, что их суммарная толщина находится в пределах 40 – 50 мкм;

- безвредностью. Преимущество перед капиллярным методом в том, что МПД предполагает меньший расход дефектоскопических материалов, позволяет оперативнее получать результат и не нуждается в обустройстве сложной системы вентиляции в стационарной лаборатории;

- простотой контрольных мероприятий;

- достаточно высокой точностью результатов;

Точность результатов магнитопорошкового контроля обусловлена:

- магнитными характеристиками контролируемых объектов;

- размерами контролируемых объектов;
- ориентацией выявляемых дефектов;
- способами нанесения ферромагнитных порошков;
- доступностью зон контроля (в случае диагностики конструкций);
- уровнем упрочнения;
- свойствами индикаторных материалов (порошков, аэрозолей и т. п.);
- толщиной покрытий, если они немагнитные;
- коагуляцией порошков и т. п.

Все из упомянутых факторов необходимо учитывать в процессе разработки технологий контроля объектов магнитопорошковым методом, в том числе при выборе индикаторов (порошков, аэрозолей и т. п.).

Однако не существует на 100 % идеального метода НК и магнитопорошковый контроль – не исключение. Он не совершенен, потому что:

- спектр возможных применений ограничен ферромагнитными сплавами с относительной магнитной проницаемостью $\mu \geq 40$. МПД может не подойти, например, если материалу свойственна существенная магнитная неоднородность и на ОК образуется много ложных индикаторных следов. Сварные швы – если они выполнены с использованием немагнитных электродов – тоже оказываются непригодны для данного метода;
- низкая универсальность. Перед проведением магнитопорошковой дефектоскопии нужно рассчитать силу тока и напряжённость поля, способ и схему намагничивания,

размагничивания, концентрацию и способ нанесения магнитного порошка (суспензии). Это особенно видно по стационарным дефектоскопам для МПД, большинство из которых – специализированные установки для контроля конкретной номенклатуры изделий заданных размеров и форм (зубчатые колёса, валы, трубы, винты);

- критически важен беспрепятственный и безопасный доступ ко всей поверхности контролируемого объекта – для полноценного выполнения всех процедур;

- наличие мешающих факторов, препятствующих выявлению дефектов. К факторам, которые могут снижать чувствительность, относится наличие покрытия, малое удлинение ОК, сложная геометрия ОК с резким изменением площади поперечного сечения, наличие участков с отличающимися магнитными свойствами, случайные контакты металлических предметов с контролируемой поверхностью с появлением ложных индикаций – «магнитной записи» и т.д. Влияет и расположение самих несплошностей. Так, магнитопорошковый не всегда способен выявить дефекты, плоскость ориентации которых образует угол меньше 30 градусов – относительно исследуемой поверхности или направления магнитного поля. Соотношение нормальной (направлена перпендикулярно к поверхности ОК, не участвует в формировании индикаций) и тангенциальной (направлена вдоль поверхности, обеспечивает формирование индикаций) составляющей напряжённости магнитного поля не должно превышать 3/1. Чувствительность также снижается на участках с большой шероховатостью или под

слоем покрытия толщиной более 40–50 мкм. Правильному проведению магнитопорошкового НК также препятствует плохая очистка от нагара, коррозии и шлака. Выявление подповерхностных несплошностей возможно, но на глубине не более 2–3 мм, и то – вероятнее, в режиме постоянного магнитного поля. Обнаружение внутренних дефектов эффективнее и рентгеном и ультразвуком;

– трудности проведения контроля малогабаритных (коротких) деталей и изделий с резким изменением площади поперечного сечения. Если длина детали менее, чем в 5 раз превышает значение квадратного корня из его ширины, то имеет место сильный размагничивающий фактор. Для нормального проведения магнитопорошкового контроля приходится выстраивать такие короткие детали в цепочки, обеспечивая при этом площадь контакта не менее 1/3 от поперечного сечения торцевой поверхности;

– большая нагрузка на зрение. Для проведения НК руководящие НТД требуют освещённости ≥ 500 –1000 лк. При работе с ультрафиолетовыми источниками света облучённость может достигать 2000 мкВт/см^2 . Всё это может приводить к переутомлению, особенно если пренебрегать защитными очками и не делать перерывы в течение смены;

– возможности расшифровки очень скромные. По сути, магнитопорошковый метод НК – это «индикаторный» вид НК, который позволяет увидеть, а не измерить дефекты. Он не предназначен для определения длины, глубины, ширины, раскрытия несплошностей. Возможности для определения типа дефекта бывают весьма ограничены. При

этом – руководящие НТД, как правило, регламентируют минимальную протяжённость и/или ширину раскрытия дефектов (индикаторных следов), при которых они подлежат регистрации и должны отражаться в заключении по результатам магнитопорошкового НК.

Тем не менее, магнитопорошковый метод НК – вполне эффективное и надёжное решение для быстрого поиска трещин и иных повреждений, выходящих на поверхность. За это его и ценят. Отказываются от него в пользу капиллярной дефектоскопии чаще всего вынужденно. Например, когда намагничивание объекта неприемлемо по техническим причинам.

Методика проведения в традиционном виде магнитопорошкового НК включает следующие операции (ГОСТ 21105-87) на примере использования способа приложенного поля:

1. Подготовка. Необходимо изучить технологическую карту, выбрать индикаторные материалы, аппаратуру, убедиться в надлежащем метрологическом обеспечении. Определиться со схемой и способом намагничивания, типом и величиной тока. Проследить за тем, что зона контроля зачищена (в случае со сварными соединениями, например, она включает в себя сам шов, плюс по 20 мм околошовной стороны с каждой стороны стыка) и шероховатость поверхности не превышает Ra 6,3 мкм (Rz 40 мкм) либо иного значения, в зависимости от НТД. Проверить шероховатость можно при помощи аттестованных образцов или профилографов (профилометров). При необходи-

мости разделить периметр на участки на 300–500 мм или обозначить начало отсчёта и закрепить мерительный пояс. Непосредственно перед контролем протереть поверхность чистой сухой ветошью и убедиться, что на ОК нет остатков ворса и иных препятствий для магнитного порошка. Если будет использоваться суспензия на водной основе, ОК предварительно нужно просушить. Работоспособность намагничивающего устройства и магнитного порошка проверяется по аттестованным контрольным образцам с действующим сертификатом калибровки (проводится раз в 3 года в аккредитованных метрологических службах). Для получения более контрастного индикаторного рисунка на поверхность можно нанести жёлтую или белую фоновую краску (толщина слоя – до 15–20 мкм).

2. Намагничивание. Для выявления поверхностных дефектов требуется переменный либо импульсный ток. Постоянный и выпрямленный ток эффективен как для поверхностных, так и для подповерхностных слоёв (на глубине в пределах 2 мм). Чтобы не допустить локального нагрева и возникновения прожогов при СПП, намагничивание проводят в прерывистом режиме «ток-пауза» (5–6 циклов длительностью 0,1–3 с, продолжительность пауз – от 1 до 5 с). Намагничивание производят поочерёдно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, регулируя межполюсное расстояние в диапазоне 70–250 мм. Чтобы обеспечить 100 % контроль всей зоны, важно не забыть про зону невыевляемости – до 20 мм вблизи полюсов.

3. Нанесение индикатора. Он должен покрывать всю исследуемую зону, включая труднодоступные ниши, глухие отверстия, пазы и пр. При использовании аэрозольных баллонов нужно следить за тем, чтобы расстояние между соплом и поверхностью составляло 200–300 мм. Перед проведением осмотра нужно дать излишкам суспензии стечь с объекта контроля.

4. Осмотр. Этот этап магнитопорошкового контроля выполняется после стекания излишков индикатора. Выявленные несплошности тщательно осматривают при помощи луп и, реже, микроскопов. В стационарных установках применяются автоматизированные системы расшифровки индикаторных рисунков. При ручном проведении дефектоскопии протяжённость и координаты несплошностей измеряют линейками, угольниками и кронциркулями из немагнитных материалов. По характеру индикаторного следа можно определить тип дефекта. Тонкие удлинённые линии указывают на плоскостные дефекты, округлые рисунки – на объёмные поры, включения и раковины. Если осаждение порошка не имеет чётких контуров, это служит косвенным признаком подповерхностных несплошностей. В зависимости от требований к чувствительности подбирается комбинированное освещение рабочей зоны с использованием разрядных и галогенных ламп. Для защиты от бликов предпочтительны светильники с рассеивателями и отражателями. Обязательна возможность регулировки интенсивности освещения. При работе с люминесцентными индикаторами задействуются источники ультрафиолетово-

го излучения 2000 мкВт/кв. см и выше с длиной волны 315–400 нм (максимум – на 365 нм).

5. Регистрация результатов магнитопорошкового контроля. Прежде всего, вносят соответствующие записи в протокол (заключение или акт) и журнал. К описанию и схематическому изображению могут прилагаться дефектограммы – фотографию или слепок (отпечаток на клейкой ленте) индикаторного рисунка. Места выявленных дефектов могут также отображаться на эскизе ОК. Файлы могут быть переданы на ПК и продублированы на USB-носителе. Если того требует инструкция, на годные участки и выявленные дефекты наносят маркировку – непосредственно по поверхности объекта.

6. Размагничивание. Остаточную намагниченность нужно убирать, так как она может спровоцировать скопление продуктов износа, мешает корректной работе электроаппаратуры и негативно влияет на последующую обработку изделия. Руководящие НТД и ОТК часто требуют размагничивать ОК таким образом, чтобы остаточная магнитная индукция не превышала 5 А/см.

Поверхности изделий, сварных соединений и околосшовных зон основного металла шириной, равной ширине шва, но не менее 20 мм с обеих сторон, очищают от грязи, масла, шлаков, окалины и других покрытий, мешающих проведению контроля. Не допускаются резкие западания поверхности, наплывы, натеки, незаполненные кратеры. Видимые типы должны быть устранены до проведения

контроля. Шероховатость контролируемой поверхности должна быть не грубее $Ra = 6,3$ мкм.

Магнитные порошки служат для визуального определения магнитных полей рассеяния над дефектами в магнитопорошковом НК. Следует иметь в виду, что во внешнем поле частицы обычно не существуют изолированно, а вследствие магнитной коагуляции образуют цепочки, длина которых определяется многими причинами, в том числе длительностью воздействия поля, вязкостью среды, в которую помещен порошок и т.д. Применяемые порошки по составу, физическим свойствам и назначению подразделяются на четыре вида:

- 1) железные, получаемые термическим разложением пентакарбонила железа $Fe(CO)_5$ или диспергированием железа электрической дугой в керосине;
- 2) получаемые в шаровых мельницах измельчением окалины, возникающей при горячей обработке стали;
- 3) технического и синтетического магнетика;
- 4) порошки ферромагнитной окиси железа, получаемые окислением магнетика.

Основная сфера применения способа остаточной намагниченности – магнитотвёрдые материалы с коэрцитивной силой 9,5–10,0 А/см и выше (магнитотвёрдыми материалами считаются материалы, коэрцитивная сила которых ≥ 4 кА/м согласно ГОСТ Р 56512-2015 «Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы»). Под коэрцитивной силой подразумевается напряжённость магнитного поля, необходи-

мая для изменения магнитной индукции от максимального значения (соответствующего состоянию насыщения) до нуля (т.е. до полного размагничивания). Магнитопорошковый контроль способом остаточной намагниченности начинается с намагничивания объекта. Далее (возможна пауза до 3–4 часов после намагничивания) наносится порошок или разведённая суспензия. После формирования индикаторного рисунка поверхность осматривают, при необходимости делают дефектограмму. СОН предполагает пропускание тока кратковременными импульсами, продолжительностью в пределах 0,5–1,0 с. Вероятность локального перегрева области контроля (ОК) в местах соприкосновения с контактными зажимными устройствами (КЗУ) при этом небольшая. Наносить суспензию можно посредством полива поверхности либо погружения в ванну. Осмотр и расшифровка выполняются после стекания остатков суспензии. Способ остаточной намагниченности может оказаться более производительным ввиду того, что после намагничивания объекта контроля можно расположить в удобном для себя положении, а на неровностях сварных швов, например, оседает меньше магнитного порошка – и образуется меньше ложных индикаций.

При использовании СПП индикаторный порошок или суспензию наносят непосредственно при намагничивании, под действием чего и формируется индикаторный след. Осмотр ведут во время намагничивания и стекания суспензии. Способ приложенного поля предусматривает пропускание тока в непрерывном режиме либо в режиме

«ток-пауза». В последнем случае длительность тока составляет 0,1–3,0 с, паузы – от 1,0 до 5,0 с. Магнитопорошковый контроль способом приложенного поля эффективен для магнитомягких материалов, которым свойственна низкая коэрцитивная сила ($\leq 9,5\text{--}10$ А/см). Как правило, они доступны для намагничивания и размагничивания в слабом магнитном поле. Но в ряде случаев СПП применяется и для объектов из магнитотвёрдых материалов. Например, если задача состоит в обнаружении дефектов подповерхностного типа на глубине 0,01–2 мм, либо при наличии не снимаемого немагнитного покрытия с толщиной, достигающей 40–50 мкм и более. СПП предпочитают также для крупногабаритных объектов, когда мощность дефектоскопа не позволяет намагничивать их до уровня, который требуется для способа остаточной намагничённости.

При выборе между вариантами СПП и СОН дополнительно учитывается кривая равной удельной магнитной энергии, конфигурацию и габариты объекта, текстуру поверхности, толщину изоляции, фактор размагничивания, вероятный характер дефектов и пр. В свою очередь, от способа проведения магнитопорошкового контроля зависит концентрация магнитного порошка в суспензии. Так, для СОН она может составлять 20 ± 5 г/л (для чёрного и цветного порошка) либо 5 ± 1 г/л (для люминесцентных магнитных индикаторов). В случае с СПП концентрация может быть снижена, соответственно, до 3–5 г/л и до 1 г/л. Точные значения зависят от конкретных требований НТД.

Выбор магнитного индикатора и способа его нанесения на поверхность детали осуществляется в зависимости от цвета магнитного порошка, шероховатости, формы и пространственного расположения поверхности ОК. Если поверхность ОК светлая или зеркальная и с низкой шероховатостью (кольца подшипников, новые оси колесных пар и т.п.), – то для контроля используется темно-серый или черный индикатор (МИНК-030, ДИАГМА-110), шероховатые и темные поверхности контролируют цветными или люминесцентными порошками и суспензиями. С точки зрения чувствительности контроля предпочтительнее люминесцентные индикаторы, но они требуют соответствующих ультрафиолетовых (УФ) облучателей, обеспечения затемнения на участках, где освещенность контролируемой поверхности более 20 лк. Кроме того, при использовании люминесцентных индикаторов необходимы средства защиты дефектоскописта от вредного УФ-излучения (спецочки или маски, печатки, халаты).

Нанесение магнитного порошка на поверхность детали можно производить:

- сухим способом;
- мокрым способом;
- магнитогуммированной пастой;
- воздушной взвесью.

Сухой способ контроля в основном применяется при контроле деталей, имеющих грубо обработанные поверхности, таких как отливки, поковки и т.п. Это связано с тем, что сухие порошки не скапливаются в шероховатостях по-

верхности. Применение сухих порошков эффективно при использовании переменного тока или выпрямленного однополупериодного тока, создающих пульсирующее магнитное поле, которое обеспечивает подвижность порошка. В первую очередь сухой порошок применяется для необработанных сварных соединений, а также по грубым поверхностям, например, в литье.

При контроле СПП на поверхность испытываемой детали наносят сухой порошок, применяя при этом легкое постукивание по детали или встряхивание ее. Чтобы нанести индикаторы, удобно использовать резиновые груши, пульверизаторы, подвижные сита и прочие приспособления.

Сухой способ также используется, чтобы обнаружить подповерхностные трещины. Сухой порошок в сочетании с выпрямленным однополупериодным током – лучший способ проведения контроля для обнаружения непровара в корне шва из тонких материалов. Сухой порошок в сочетании с выпрямленным однополупериодным током обычно используется для контроля литья с целью обнаружения горячих и холодных трещин.

При всех вариантах сухого способа порошок следует наносить на контролируемую поверхность равномерно, без образования более темных (обогащенных) или светлых (обедненных порошком) мест.

Обычно для получения ясного, четкого рисунка над дефектом излишний порошок или сдувается, или удаляет-

ся путем поворачивания детали либо путём наклона её, применяя при этом лёгкое постукивание.

Сила воздушной струи должна быть достаточно сильной, чтобы удалить лишние частицы, но не настолько сильная, чтобы нарушить положение частиц, образующие индикации и удерживаемые магнитными полями рассеяния над дефектами.

Сухой магнитный порошок нельзя использовать при контроле средней части оси седлообразным намагничивающим устройством, а также шеек оси, колец подшипников, участков с резьбой и цилиндрических деталей диаметром менее 60 мм.

В остальных случаях можно использовать сухой или мокрый способ, хотя с точки зрения чувствительности предпочтительнее мокрый способ. Однако, если пропускать ток по детали или намагничивающим устройством с открытыми токоведущими частями в приложенном поле, то наносить суспензию опасно с точки зрения возможного поражения дефектоскописта током, в этом случае также лучше использовать сухой порошок. Кроме того, магнитные порошки не следует применять для поверхностей, которые нельзя обезжирить или просушить, а также для мелких деталей даже с плоскими поверхностями.

Мокрый способ – наиболее распространенный и производительный способ нанесения порошка на контролируемую поверхность ОК. После намагничивания или во время него контролируемая деталь или ее контролируе-

мый участок должны быть равномерно и обильно обработаны суспензией с заданной концентрацией порошка.

Нанесение индикатора проводится:

- либо путем полива детали суспензией;
- либо путем окунания ее в ванну с хорошо перемешанной суспензией (последний способ применяется в основном при использовании СОН).

Мокрый способ имеет несколько преимуществ перед сухим способом.

Во-первых, все поверхности ОК могут быть быстро и легко покрыты относительно однородным слоем частиц.

Во-вторых, жидкая основа обеспечивает подвижность магнитных частиц в течение большего промежутка времени, который позволяет скапливаться им в слабых полях рассеяния дефектов и формировать более четкие индикации. Поэтому мокрый способ является наилучшим для обнаружения очень мелких дефектов гладкой поверхности.

Тем не менее, на грубой поверхности частицы (которые имеют очень маленькие размеры) могут скапливаться в неровностях поверхности и потерять подвижность, становясь менее эффективными, чем сухие порошки при таких условиях. Суспензия часто наиболее подходит для наклонных, цилиндрических и вертикальных поверхностей ОК.

В составе магнитной суспензии частицы магнитного порошка находятся во взвешенном состоянии – в воде, масле, керосине или специальном концентрате с добавле-

нием поверхностно-активных веществ. Наносятся кистью, распылением из аэрозольного баллончика либо пульверизатора, погружением в ванны, поливом из шланга, форсунок и пр.

При нанесении магнитной суспензии из аэрозольного баллончика распылением требуется соблюдение технологии:

- тщательно встряхивайте аэрозольный баллон с магнитной суспензией непосредственно перед использованием, пока не услышите, что шарики, способствующие перемешиванию, стучат свободно;

- удерживайте баллон на расстоянии 200–300 мм от поверхности.

При нанесении магнитной суспензии путём полива следует наносить её слабой струей, таким образом и с такого расстояния, чтобы не смывать образующиеся индикаторные рисунки.

При поливе деталь следует располагать так, чтобы суспензия при стекании, не застаивалась в отдельных участках (углублениях, «карманах», между ребрами и др.).

Если направление движения суспензии, стекающей по поверхности детали, совпадает с направлением дефектов, картина осаждения порошка получается более чёткой.

При контроле СПП обработка деталей суспензией должна заканчиваться до того, как будет выключено намагничивающее поле. Магнитное поле в этом случае должно выключаться только после стекания основной массы суспензии.

Стекание основной массы суспензии – это состояние, при котором дальнейшее стекание суспензии не изменяет картины отложения порошка над дефектом, в том числе и при повторном включении намагничивающего устройства.

Суспензия должна быть тщательно перемешана непосредственно перед применением.

Разновидностью сухого способа является способ «воздушной взвеси» с помощью специальных установок закрытого типа. Из обычного серийно выпускаемого порошка выделяется высокодисперсная фракция (с размерами частиц 0,1–10 мкм), которая в виде воздушной взвеси наносится на деталь.

Контроль с применением способа воздушной взвеси должен проводиться либо в специальных камерах, обеспечивающих напыление только на контролируемую деталь, либо при наличии отсасывающих устройств.

Магнитные суспензии приготавливаются из компонентов и в пропорциях, представленных в таблице 2.2.1.

Выявляющую способность магнитных индикаторов проверяют с помощью стандартных образцов предприятий (СОП) с искусственными дефектами, при этом могут применяться специализированные приборы и отраслевые стандартные образцы.

Допускается проверку работоспособности средств контроля проводить с помощью СОП с естественными дефектами (не обнаруживаемыми визуально трещинами) при обеспечении проверки выявляющей способности маг-

нитных индикаторов предварительно на специализированных устройствах (например, МОН-721, МФ-10СП) и режима намагничивания деталей.

Таблица 2.2.1

Магнитные суспензии [22]

Основа индикатора	Жидкая среда и пропорции веществ	Особенности приготовления
цветные		
КМС ДИАГМА-1200	30±5 г/л воды	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду
КМС МИНК-010	25±5 г/л воды	
темные		
КМС ДИАГМА-1100	40±5 г/л воды	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду
КМС МИНК-030	25±5 г/л воды	
ТУ-6-36-05800165-1009-93	25±5 г/л воды с добавками по РД 32.159-2000	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду
порошок МИНК-070	25±5 г/л трансформаторного масла, дизельного топлива или керосиново-масляной смеси (масла 30% объема)	Необходимое количество порошка развести в небольшом объеме смеси до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся жидкую составляющую
люминисцентные		
КМС ДИАГМА-1613	20±5 г/л воды	Необходимое количество концентрата развести в небольшом объеме воды до однородной массы и, непрерывно помешивая, добавить оставшуюся воду
КМС ДИАГМА-2623	20±5 г/л воды	
КМС МИНК-045Л	10...15 г/л воды	

Допускается проверку работоспособности средств контроля проводить с помощью СОП с естественными де-

фектами (не обнаруживаемыми визуально трещинами) при обеспечении проверки выявляющей способности магнитных индикаторов предварительно на специализированных устройствах (например, МОН-721, МФ-10СП) и режима намагничивания деталей. Периодичность проверки магнитных индикаторов представлена в таблице 2.2.2.

Таблица 2.2.2

Периодичность проверки магнитных индикаторов

Основания для проверки	Средства проверки	Сроки или периодичность
При поступлении новых индикаторов (с обязательным составлением акта о качестве индикатора)	МФ-10СП	При отсутствии сертификатов качества или других документов, удостоверяющих соответствие – при приобретении
При окончании срока годности индикатора		По истечении срока годности с назначением нового срока годности
После приготовления новой суспензии	На СОП с искусственными дефектами или	Каждый раз
При повторном применении суспензии	МОН-721 и СОП с естественными	
В начале смены	дефектами или тест-образцах (тест-объектах)	Ежедневно

При поступлении с предприятия-изготовителя и после истечения гарантийного срока хранения магнитный порошок или КМС (см. таблицу 2.2.1) проверяют в дорожных или заводских лабораториях на соответствие требованиям технических условий. По результатам проверки магнитных индикаторов должен быть оформлен акт. Магнит-

ные индикаторы могут быть использованы по назначению при получении положительных результатов проверки.

Дисперсионная среда магнитных суспензий должна быть чистой, прозрачной и обеспечивать хорошее смачивание контролируемой поверхности. Дисперсионная среда для приготовления суспензий на основе люминесцентных магнитных порошков не должна светиться при ультрафиолетовом облучении и гасить люминесценцию порошка.

При использовании в качестве дисперсионной среды магнитных суспензий технических масел или масляных смесей, не указанных в таблице 2.2.1, необходимо определять их кинематическую вязкость в лабораторных условиях, при этом:

- вязкость дисперсионной среды суспензий на основе магнитного порошка типа ПЖВ5-71 по ГОСТ 9849 должна быть в диапазоне от 5×10^{-6} до 36×10^{-6} м²/с (от 5 до 36 сСт) при температуре контроля;

- вязкость дисперсионной среды суспензий на основе черного магнитного порошка по ТУ6-36-05800165-1009 должна быть $\leq 10 \times 10^{-6}$ м²/с (10 сСт) при температуре контроля.

Магнитные порошки и КМС хранят в закрытых емкостях в соответствии с требованиями инструкций по их применению. Магнитные суспензии хранят в плотно закрытых емкостях, изготовленных из немагнитных материалов. Водные магнитные суспензии при хранении и использовании необходимо оберегать от попадания в них техни-

ческих масел, керосина и других загрязняющих материалов, которые могут вызвать коагуляцию магнитных частиц.

Магнитные суспензии, приготовленные с применением технических масел и смеси масел с дизельным топливом или керосином, необходимо оберегать от попадания в них воды и загрязнений, которые могут вызвать коагуляцию магнитных частиц.

Пригодность и выявляющая способность порошков периодически проверяется при помощи контрольных образцов с искусственными или естественными дефектами (трещинами, пропилами, отверстиями), а также спецпринадлежностей – колбы-центрифуги и др.

Оценка чувствительности магнитопорошкового метода НК

Для оценки чувствительности метода магнитопорошкового НК применяют специальные приборы, контрольные образцы с искусственными дефектами, детали с эксплуатационными дефектами, тест-образцы. Для количественной оценки чувствительности магнитных индикаторов без использования эталонных магнитных порошков предназначен, к примеру, прибор У-2498 (рисунок 2.2.19).

Принцип работы прибора У-2498 основан на создании плавно убывающего поля рассеяния над искусственным дефектом. Прибор У-2498 состоит из контрольного образца, регулятора тока, амперметра, трансформатора, смонтированных в корпусе прибора, и приспособлений для нанесения суспензии и осмотра. Контрольный образец состоит из двух призм 1 и 2, шлифованных друг к другу.

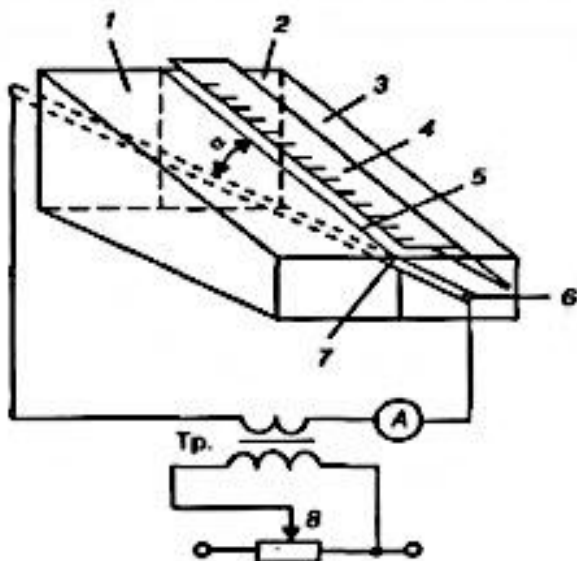


Рисунок 2.2.19 – Схема прибора У-2498 [9]

В плоскости соприкосновения призм 1 и 2 просверлено отверстие 7 так, что его продольная ось направлена под углом α к плоскости 3. Стык между призмами 1 и 2 на плоскости 3 имитирует трещину. В отверстие 7 продет кабель 6, при протекания тока, в котором создается магнитное поле над искусственным дефектом – стыком призм 1 и 2. Кабель 6 подсоединен ко вторичной обмотке трансформатора Тр. Ток в кабеле регулируют потенциометром 8 и измеряют амперметром А.

Исследуемый магнитный порошок или суспензию наносят на поверхность 3. При этом над искусственным дефектом накапливается порошок в виде валика 5, длину которого измеряют откидной линейкой 4. Чувствительность

магнитных индикаторов – магнитных порошков оценивают по валику 5.

В советской практике магнитопорошкового НК для определения коэффициента чувствительности магнитных индикаторов применялся прибор ПСМС-2М с диапазоном измерения чувствительности магнитных суспензий 0,2–5,0 при допуске значения основной относительной погрешности измерения чувствительности магнитных суспензий $\leq \pm 5\%$. Чувствительность магнитных индикаторов (суспензий, порошков) величина относительная – это отношение принимаемой за 1 напряженности поля рассеяния, но в А/м к минимальной напряженности поля рассеяния Н в А/м, при которой искусственный дефект выявляется исследуемым индикатором (суспензией или сухим порошком).

В основополагающий принцип действия электрической схемы прибора МФ-10СП (рисунок 2.2.20, а), предназначенного для оценки чувствительности магнитных порошков и суспензий, заложено использование модели магнитного поля рассеяния, равномерно убывающего по длине искусственного дефекта в контрольном образце. Образец содержит две ферромагнитные пластины 1 и 2 (рисунок 2.2.20, б), пришлифованные друг к другу, на стыке которых образуется искусственный прямолинейный дефект 3. Снизу образца на ферромагнитных сердечниках 4 расположены обмотки 5 (на рисунке 2.2.20, б показана лишь одна обмотка). Изменением токов обмоток 5'–8' резисторами R1–R4 добиваются таких их значений, при кото-

рых изменение поля рассеяния по длине искусственного дефекта становится линейным.

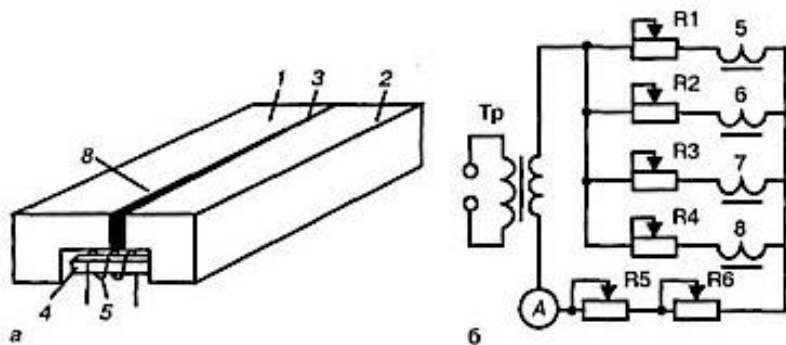


Рисунок 2.2.20 – Электрическая схема прибора У-2498 (а) и устройство контрольного образца [9]

Принципиальная электрическая схема специализированного прибора МФ-10СП содержит трансформатор Тр, амперметр А, резисторы R1-R4, обмотки 5–8, потенциометры грубой R5 и точной R6 установки тока. При нанесении суспензии над дефектом накапливается порошок, образуя валик 8, по длине которого определяют чувствительность суспензии или магнитного порошка. Длина валика над искусственным дефектом не должна быть менее 40 мм для суспензий, предназначенных для контроля деталей авиационной техники, например.

Для определения качества магнитных суспензий предназначен **эталонный образец с постоянным магнитом** (рисунок 2.2.21).

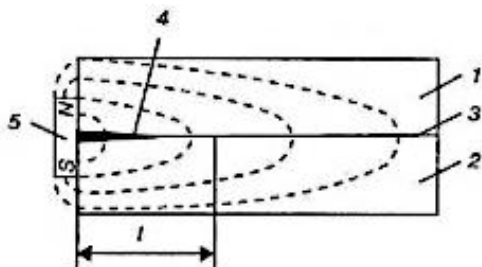


Рисунок 2.2.21 – Схема устройства эталонного образца [9]:

- 1, 2 – пластины; 3 – стык между пластинами;
4 – искусственный дефект; 5 – постоянный магнит

Образец содержит две призмы 1 и 2, пришлифованные друг к другу. Стык 3 между призмами на рабочей поверхности представляет собой искусственный дефект. Под действием поля магнита 5 призмы намагничиваются, а над искусственным дефектом накапливаются частицы порошка, образуя индикаторную линию 4, по длине l которой оценивают качество магнитной суспензии или сухого порошка. Образец портативный.

Оценка правильности выбора реализации магнитопорошкового метода НК

Для определения правильности выбора реализации магнитопорошкового метода НК определяется правильностью выбора режима намагничивания и качества магнитной суспензии посредством использования **тест-образца Бертольда** (рисунок 2.2.22, а), основной частью которого является диск, состоящий из четырех секторов 3, каждый из которых имеет центральный угол 90° .

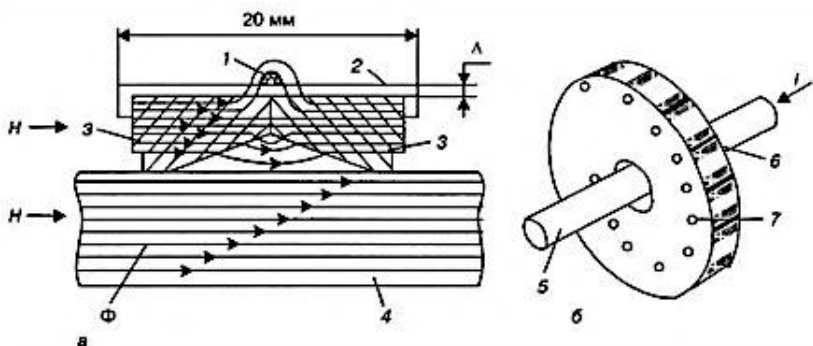


Рисунок 2.2.22 – Схема устройства образцов [9]:
 а – образца Бертольда; б – кольцевого образца (ASME);
 1 – валик из порошка; 2 – крышка; 3 – ферромагнитные
 секторы; 4 – проверяемая деталь; 5 – центральный
 проводник; 6 – осаждение порошка; 7 – отверстия;
 Φ – магнитный поток; H – вектор напряженности поля

Секторы выполнены из магнито-мягкого материала. Стыки между секторами на рабочей поверхности представляют собой два искусственных взаимно перпендикулярных дефекта. Поверхность секторов закрыта крышкой 2 немагнитного материала, расстояние А до которой от поверхности секторов можно изменять. Большее расстояние А соответствует большей чувствительности контроля.

Для проверки качества суспензии и режима намагничивания образец устанавливают на проверяемую деталь и создают магнитное поле. При этом над искусственным дефектом образуется поле рассеяния, и при нанесении суспензии индикаторная линия из магнитного порошка 1 образуется над тем стыком, направление которого с вектором поля составляет угол не менее 30° .

Режим, соответствующий четкой индикаторной линии, принимают за оптимальный.

По выявлению искусственного дефекта можно сделать заключение о том, что поле к направлению дефекта направлено под углом 30–90 °. Более точно определить направление поля с помощью такого типа прибора нельзя. Образец может быть эффективно использован только при контроле способом приложенного поля.

Образец кольцевой (ASME) (рис. 2.2.22, б) предназначен не только для определения качества суспензии, но и работоспособности дефектоскопа. Образец представляет собой диск толщиной 7/8" (22,2 мм). Он имеет внешний диаметр 5" (127 мм), внутренний – 1 1/4" (31,75 мм). Перпендикулярно плоскости диска на различном расстоянии от внешней цилиндрической поверхности просверлены 12 отверстий, каждое диаметром 1,78 мм.

При пропускании тока I по центральному проводнику 5 образуются поля рассеяния, убывающие по мере увеличения расстояния отверстия до цилиндрической поверхности.

При нанесении на диск магнитной суспензии над отверстиями на цилиндрической поверхности происходит накопление магнитного порошка 4, образуя индикаторные линии 6. По числу индикаторных линий оценивают качество магнитной суспензии.

Для оценки качества суспензии применяют специализированный сосуд ASME, в котором наблюдают процесс

оседания и уровень осевшего порошка, а также различные образцы с искусственными дефектами.

Для проверки качества индикатора применяют также образцы обычно цилиндрической формы с шлифовочными трещинами (рисунок 2.2.23). Тугоплавкие вставки 4–8 служат для имитации различных несплошностей. Образец намагничивают пропусканием переменного или постоянного тока по проводнику 9.

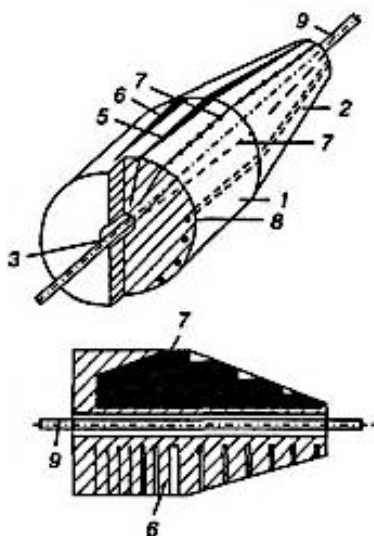


Рисунок 2.2.23 – Схема эталонного образца [9]:

- 1 – литой цилиндр образца;
- 2 – конус образца;
- 3 – цилиндрическое отверстие по оси образца

Точная проверка качества индикатора производится перед началом работы, после заполнения ванны дефектоскопа вновь приготовленной суспензией, а также во всех случаях, когда возникает подозрение в снижении качества магнитной суспензии.

Эталонные образцы имеют диаметр 20–30 мм. Их длина с ручкой составляет 150–250 мм. На поверхности образцов находятся шлифовочные трещины глубиной от 0,01 до 0,1 мм. Наиболее характерные трещины выделены и подлежат обязательному выявлению. Индикатор именно такой конструкции считается наиболее качественным.

Тугоплавкие вставки-имитаторы дефектов для эталонных образцов изготавливаются из неферромагнитного и более тугоплавкого материала. Так для стали Ст3 используются танталовая, ниобиевая, вольфрамовая, графитовая, кварцевая и другие различные композиции вставок.

Обнаружение имитаторов в поверочных испытаниях позволяет нормировано контролировать параметры (выявляемости, чувствительности, разрешающей способности) различных средств неразрушающего контроля.

Получаемый для нормирования индикаторный рисунок (рисунок 2.2.24) сравнивают с рисунками, зафиксированными на дефектограмме.

Если на эталонном образце мелкие трещины не выявились, а на дефектограмме имеются, то принимают меры по восстановлению чувствительности суспензии, устраняют другие возможные причины.

Оборудование и принадлежности магнитопорошкового НК

Что касается оборудования, то для магнитопорошкового НК предусмотрены следующие виды аппаратуры и приспособлений:

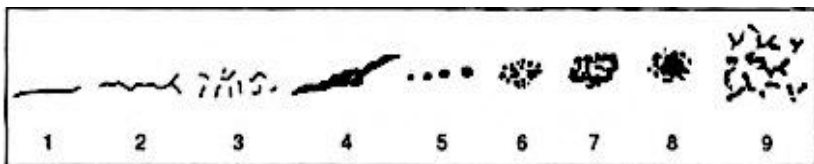


Рисунок 2.2.24 – Основные типы дефектов, определяемых с помощью магнитопорошкового метода [9]:

1 – холодные трещины; 2 – горячие трещины; 3 – мелкие закалочные трещины; 4 – глубокие трещины; 5 – поры разного размера; 6 – скопление пор; 7 – пористая структура; 8 – глубокие поры; 9 – коррозионное растрескивание

– дефектоскопы, стационарные и переносные, универсальные и специализированные (к примеру, галтелей малого радиуса), позволяющие получать необходимые поля и создавать оптимальные условия НК. Требования к дефектоскопам для магнитопорошкового НК содержатся в ГОСТ Р 53700-2009. При выборе модели учитывают поддержку способов СОН и/или СПП, напряжение питания, минимальное и предельную величину намагничивающего тока, его вид, плавность регулировки, режимы размагничивания, время уменьшения магнитного поля от максимального значения до нуля при размагничивании (должно быть < 5 мс) и т.д. Широкое распространение получили переносные и передвижные (менее мощные) дефектоскопы. Как правило, они представляют собой источники переменного, постоянного (однополупериодвыпрямленного) и реже – импульсного тока. Один такой дефектоскоп иногда позволяет работать с двумя видами тока. Передвижные и переносные универсальные дефектоскопы предназначены для намагничивания и контроля в полевых усло-

виях и т. п. Как правило, такие дефектоскопы снабжают комплектом элементов для контроля (сухие порошки и устройства для их напыления, сосуды с суспензией и т. п.). При магнитопорошковом НК переносные и передвижные универсальные дефектоскопы позволяют производить циркулярное намагничивание с помощью токовых контактов, помещаемых на участке поверхности, продольное намагничивание с помощью кабеля, навиваемого на деталь, или иногда с помощью электромагнита. В отдельную группу можно выделить автоматизированные системы (АС) магнитопорошкового НК на производствах, где собственно дефектоскоп – лишь один из модулей, а поиск и распознавание дефектов осуществляет специальная АС;

- намагничивающие устройства (соленоиды, электромагниты, «ярмо»), постоянные магниты и размагничивающие устройства;

- средства измерения напряжённости и индукции магнитных полей (магнитометры, ферритометры и др.);

- светильники полного спектра (видимый свет) и ультрафиолетовые светильники, а также люксметры для измерения уровня освещённости (рисунок 2.2.25);

- контрольные образцы – для оценки качества порошков, концентратов, паст и суспензий, калибровки и настройки дефектоскопов (в первую очередь, МО-1, МО-2, МО-3, МО-4, МО-5, KETOS и другие);

- магнитные индикаторные полоски, ASTM-колбы для оценки концентрации взвешенных в жидких растворах магнитных частиц;

– лупы, микроскопы, зеркала и т.д.



Рисунок 2.2.25 – Люксметры [22]:
а – DT-1308; б – MS-6610; в – Testo-540

В **специализированных дефектоскопах** применяют разновидность сухого способа нанесения индикатора – **метод аэрозоля**, при котором магнитный порошок распыляется и находится во взвешенном состоянии в замкнутом объеме (рисунок 2.2.26, б).

Объект контроля 1 помещен внутрь камеры с двойными стенками. Снизу, под давлением, через воздухопроницаемую перегородку 2 поступает воздух, поддерживающий в рабочем объеме магнитный порошок 3 во взвешенном состоянии. Выходу порошка наружу препятствует крышка 4. Из объема камеры через фильтры 5 воздух выходит в промежуток между стенками камеры наружу.

Широкое распространение получил и **мокрый способ**, когда используются специальные суспензии из 20–30 г магнитного порошка, разведенного в 1 л воды, керосина или масла. Часто в суспензию добавляют вещества, улучшающие смачиваемость поверхности и антикоррозионные добавки.

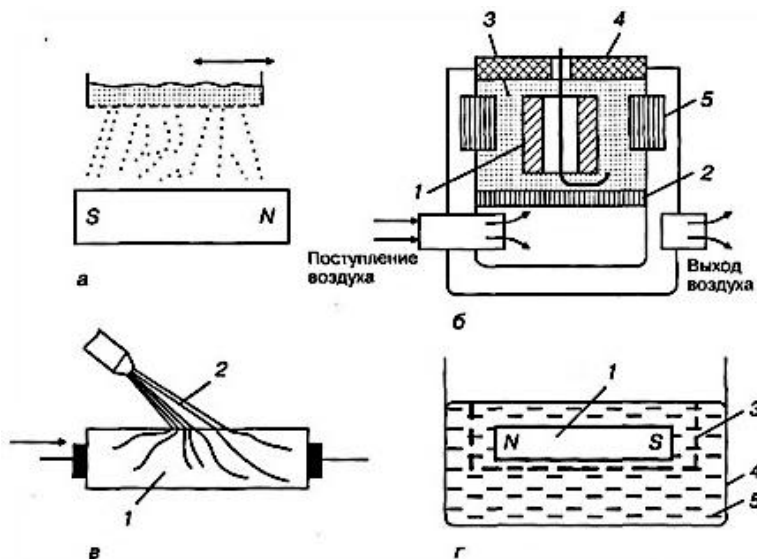


Рисунок 2.2.26 – Способы нанесения магнитопорошкового индикатора [9]

В процессе намагничивания деталь 1 обрабатывается струей суспензии 2 (рисунок 2.2.10, в) или кладется в сетку 3 и вместе с ней помещается на 30–40 с в ванну 4 с хорошо перемешанной суспензией 5 (рис. 2.2.10, г).

Визуальный смотр детали проводят сразу после обработки суспензией при освещенности около 500 лк.

На рисунке 2.2.27 показаны вспомогательные принадлежности для магнитопорошкового НК, включающие:

- раскидные намагничивающие катушки;
- размагничивающие катушки;
- магнитоскоп для определения степени размагничивания различного рода средств нанесения индикатора;

– сосуд по стандарту ASTM для контроля индикаторных жидкостей.

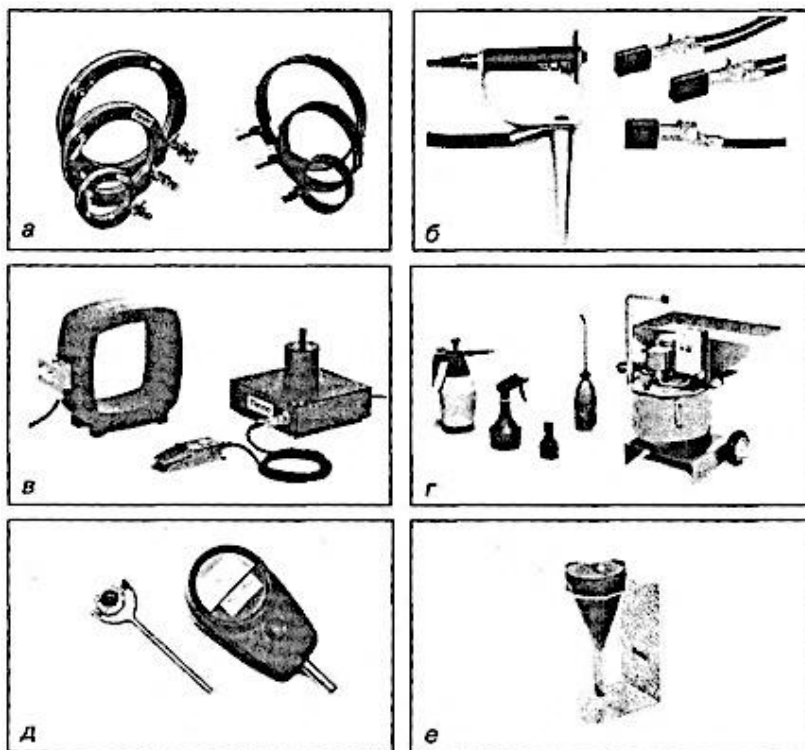


Рисунок 2.2.27 – Вспомогательные принадлежности для магнитопорошкового НК [9]:

а – раскидные и замкнутые намагничивающие катушки \varnothing 200, 350 и 500 мм; *б* – ручка с электродом типа «Контакфлюкс», магнитные электроды; *в* – размагничивающая катушка ЕТТ: размеры пропускного отверстия 150–550 мм; *г* – ручные распыриватели, передвижной насос для индикаторных жидкостей; *д* – эталон для определения степени обнаруживаемости дефектов; магнитоскоп для определения степени размагничивания; *е* – сосуд по стандарту ASTM со штативом для контроля индикаторных жидкостей

Магнитные индикаторы на подвергаемые НК детали наносят:

– взвешенными в жидкости (воде, керосине, минеральном масле), образующими суспензии – «мокрым способом»;

– «сухим способом» – нанесением сухого порошка с помощью пульверизатора, качающегося сита, резиновых груш, сеток и других устройств;

– способом «воздушной взвеси» – распылением высокодисперсного порошка в камерах с помощью специальных установок.

Намагниченные детали поливают магнитной суспензией или погружают их в ванну с суспензией на 5–8 с.

Если позволяют условия, то проводят осмотр под тонким слоем жидкости, не извлекая деталь из суспензии.

Полимеризующиеся смеси наносят с помощью шпателя, поливом, заливкой смеси в проверяемые полости.

Осмотр отпечатка проводят после его снятия с подвергнутой НК детали.

Размеры магнитных частиц оценивают их наибольшим размером a : для сферических магнитных частиц – это диаметр, для магнитных частиц кубической формы с закругленными гранями – ребро куба, для удлиненных частиц – наибольший их размер. Удельная поверхность – это общая поверхность всех частиц, приходящаяся на единицу объема порошка.

Порошок, частицы которого имеют приблизительно одинаковые размеры, называется монодисперсным. По-

рошок, частицы которого имеют разные размеры, называется полидисперсным. Каждый тип частиц требует своих технологических приемов.

Интенсивность образования конгломератов характеризует потерю агрегативной устойчивости суспензии. Интенсивное слипание частиц с образованием более крупных частиц провоцирует снижение, а иногда полную потерю чувствительности магнитной суспензии. Для предотвращения соединения мелких частиц в более крупные в суспензию вводят поверхностно-активные вещества, молекулы которых имеют дипольное строение. Из-за адсорбции таких молекул на частицах порошка все частицы оказываются заряженными электростатическими зарядами одного знака, возникают электростатические силы отталкивания, препятствующие сближению частицам на расстояния, на которых возникают значительные силы притяжения. В итоге суспензия обретает агрегативную устойчивость, что обеспечивает ее высокую чувствительность.

Для обнаружения достаточно мелких трещин, волокон наиболее эффективно применение порошков в органических средах при величине значений поперечника частиц 0,5–10 мкм. При этом обеспечивается выявление трещин как в начальной стадии их возникновения (шириной раскрытия 0,5–1 мкм), так и при образовании относительно крупных трещин, шириной раскрытия более 0,1 мм.

Индентор-порошок магнитный черный соответствует ТУ 6-36-05800165-1009-93 представляет собой измельченную закись-окись железа Fe_3O_4 . Он получается

фильтрацией шламовой жидкости с последующей сушкой при температуре 400–500 °С и размолом. Размер основной массы частиц не более 30 мкм. Выявляемость (чувствительность), определенная на приборе типа ПВ-1 – 100 %. Порошок используется в органических и водных суспензиях при контроле «способом воздушной взвеси».

Буро-красный порошок (ИРЕА-6) – это смесь окислов железа, в основном γ - Fe_2O_3 . Основная масса частиц 0,5–10 мкм с небольшим содержанием крупных частиц. Может применяться в органических и водных суспензиях.

Паста магнитная черная РОСАВА-1100 имеет размер частиц 1–3 мкм. Чувствительность, определенная на приборе ПВ-1, для этого индикатора 90–100 %.

Паста магнитная КМ-К (ГОСТ 23694-79) с целью приготовления керосиновой, масляной и керосино-масляной суспензии предназначена для контроля деталей с темной поверхностью. Она представляет собой густотертую смесь красного цвета, состоящую из топкодисперсной окиси железа, вазелина и поверхностно-активного вещества. В состав пасты входит 46–50 % окиси железа, 50 % вазелина и 2 % поверхностно-активного вещества. Не взрывоопасна, не пожароопасна. Перед употреблением пасту разводят в дисперсионной среде в концентрации от 10 до 40 г/л. В случаях, предусмотренных в технической документации (например, при контроле резьбы, лопаток турбин и т. п.), допускается использование магнитной пасты минимальной концентрации 10 г/л. В качестве дисперсионной среды применяют осветительный керосин (ГОСТ 4753-68), топливо для реак-

тивных двигателей (ГОСТ 10227-62) или трансформаторное масло (ГОСТ 10121-76). Для этих целей выпускаются различные пасты.

Магнитную черную пасту ЧВ-1 (ТУ 6-09-1823-80) используют для приготовления стандартной суспензии в следующей пропорции: на 1 кг воды берут 60 г пасты. Чувствительность суспензии контролируется по прибору ПВ-1.

Магнитную красную пасту КВ-1 (ТУ 6-09-1823-80) используют для приготовления стандартной суспензии в следующей пропорции: на 1 л воды берут 80 г пасты.

Люминесцентную пасту МЛ-1 (ТУ 6-14-1550-76) для приготовления водной суспензии в следующей пропорции: на 1 л воды берут 42 г пасты.

Магнитно-люминесцентный порошок марки Люмаглор-5 (ТУ 6-09-5296-86) для приготовления органических и водных суспензий в следующей пропорции: на 1 л жидкости суспензии берут 5 г порошка.

Органическую суспензию (на основе керосина, масла или их смеси) с черным порошком соответственно ТУ 6-36-05800165-93, стабилизированную присадкой марки Акор-1 (ГОСТ 15171-70) приготавливают в следующей пропорции: в порошок вносят присадку Акор-1 (0,5–5 % от массы порошка) и керосин или масло МК-8 (ГОСТ 6457-66) или трансформаторное масло (ГОСТ 10121-62) в количестве, необходимом для получения пастообразной массы. Эту массу тщательно размешивают, вливают в жидкость (керосин, масло или их смесь). Для удаления крупных и слипшихся частиц полученную суспензию фильтруют.

Водная магнитная суспензия. Приготовление 1 л такой суспензии: в небольшом количестве воды при температуре 30–40 °С растворяют 2 г сульфанола, 15 г нитрита натрия и засыпают 25 г магнитного порошка. Полученную смесь тщательно размешивают, а затем вливают в емкость с 1 л воды. Концентрацию суспензии изменяют в зависимости от способа контроля, напряженности поля, формы поверяемой поверхности и других факторов.

2.2.3. Магнитографический метод НК

Метод магнитографического НК основан на обнаружении магнитных полей рассеяния, возникающих в местах дефектов при намагничивании контролируемых изделий. Поля рассеяния от дефектов фиксируются в виде магнитных отпечатков на эластичном магнитоносителе (магнитной ленте), плотно прижатом к поверхности шва.

Процесс магнитографического метода НК состоит из двух основных операций:

- намагничивания объектов контроля (деталей, прочих изделий) специальными устройствами, при котором поля дефектов записываются на магнитную ленту;

- воспроизведения или считывания записи с ленты, осуществляемого магнитографическим дефектоскопом.

Магнитографический метод НК можно применять для проверки сплошности стыковых швов, плоских изделий и труб различных диаметров, изготовленных из ферромагнитных металлов, с толщиной стенки 1–16 мм. Магнитную ленту магнитным слоем накладывают на контро-

лируемый шов и подвергают его намагничиванию с одновременной записью полей рассеяния на ленту. Применяют магнитографические дефектоскопы типа МД-9, с комплектом намагничивающих устройств, предназначенных для магнитографического контроля качества сварных швов трубопроводов, листовых и других конструкций.

Характер дефектов определяют по видеоиндикатору. Форма изображения на экране соответствует форме дефекта, а степень почернения характеризует его глубину. Трещины характеризуются наличием извилистых темных линий с большой контрастностью, непровары – прямыми линиями, шлаковые включения – темными пятнами и т.д.

2.2.4. Феррозондовый метод НК

Феррозондовый метод НК основан на обнаружении **феррозондовым преобразователем** магнитного поля рассеяния дефекта на намагниченной детали за счет выявлений пространственных искажений магнитного поля над дефектом. Искаженное поле над дефектом называется полем рассеяния дефекта или полем дефекта. Выявляются поля рассеяния с помощью феррозондового преобразователя, преобразующего градиент напряженности магнитного поля в электрический сигнал.

Феррозондовым методом НК обнаруживаются поверхностные и подповерхностные (глубина залегания до 30 мм) дефекты типа нарушения сплошности: волосовины, трещины, раковины, закаты и т.д. Метод также применяют

для обнаружения дефектов сварных швов: непроваров, трещин, неметаллических включений, пор и т. п.

Также как и в магнитопорошковом НК различают два способа феррозондового НК: СПП и СОН.

2.2.5. Индукционный метод НК

Индукционный метод НК для выявления места повреждения основан на принципе улавливания магнитного поля над кабелем, по которому генератором ТИ-ТДИ-3А, в частности (рисунок 2.2.12), пропускается ток высокой частоты. Данный метод пригоден для применения во всех случаях, когда в месте повреждения кабеля удастся получить электрическое соединение 1–2-х жил через малое переходное сопротивление вследствие потенциальной возможности обеспечения практически абсолютной точности, из-за чего имеет широкое распространение. Вокруг кабеля, по которому в случае применения индукционного метода НК пропускается ток от генератора звуковой частоты (800–3000 гц) образуется магнитное поле, величина которого пропорциональна величине тока в кабеле.



Рисунок 2.2.12 – Генератор ТИ-ТДИ-3А [10]

2.2.6. *Дополнительные подвиды магнитного метода НК*

В подавляющем большинстве ситуаций, связанных с магнитным контролем, приходится иметь дело с кратковременным измерением или индикацией магнитных полей в относительной близости от поверхности изделий. В этих случаях используют различные магнитные преобразователи, из которых наиболее широкое распространение получили феррозондовые, датчик Холла, индукционные и магниторезистивные.

Метод эффекта Холла – метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей объекта контроля преобразователями Холла.

Магниторезистивный метод – метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитного поля объекта контроля магниторезистивными преобразователями.

Магнитополупроводниковый метод – метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитного поля объекта контроля магнитополупроводниковыми приборами.

Пондеромоторный метод – регистрация силы отрыва постоянного магнита или сердечника электромагнита от поверхности изделия и оценка толщины контролируемого покрытия по значению этой силы определяется *пружинными динамометрами* или изменением *тока намагничивания*.

Магнитооптический метод – метод магнитного неразрушающего контроля, в котором преобразователем

служит магнито-оптическая пленка. При освещении пленки видна доменная структура, которая искажается при наличии магнитного поля дефекта.

Неразрушающий контроль методом **магнитной памяти металла (ММП-контроль)** основан на измерении и анализе распределения собственных магнитных полей рассеяния (СМПР) металла сварных соединений, отображающих их структурно-технологическую наследственность. ММП-контроль служит для определения зон концентрации механических напряжений (ЗКН) в сварных соединениях трубопроводов, оборудования сосудов и иных конструкций. При этом ММП-контроль является первоочередным по отношению к известным методам дефектоскопического НК (ультразвукового, радиационного, магнитопорошкового, капиллярного, цветной дефектоскопии, толщинометрии и измерения твердости). Данный метод НК позволяет контролировать сварные соединения любых размеров и форм (стыковые, тавровые, угловые, нахлестанные, торцевые, прерывистые и др.) без ограничения толщины свариваемого металла на всех видах ферромагнитных и аустенитных сталей и сплавов и на чугунах.

При применении ММП-контроля определяют:

- зоны концентрации остаточных сварочных напряжений и их распределение вдоль сварного соединения;
- зоны вероятного расположения микро- и макродефектов всех видов (несплошности, трещины, поры и др.).

Метод ММП выполняет одновременно при НК одновременно две задачи:

- выявления дефектных зон на внутренней и наружной поверхностях трубы с их последующей классификацией;
- выполнения контроля напряженно-деформированного состояния металла объекта контроля с определением зон концентраций напряжений – источников всех видов повреждений на раннем этапе их развития.

Контрольные вопросы

1. Какие подготовительные операции необходимы перед проведением магнитопорошкового контроля?
2. От чего зависит выбор вида намагничивания?
3. Перечислите способы полюсного намагничивания?
4. Перечислите способы циркулярного намагничивания?
5. В каких случаях используется комбинированное намагничивание?
6. Какие требования предъявляются к освещению контролируемых в видимом свете поверхностей?
7. Какие требования предъявляются к освещению контролируемых в ультрафиолетовом свете поверхностей?
8. Какой способ циркулярного намагничивания полых деталей наиболее надежен?
9. Что такое область эффективного намагничивания?
10. В чем достоинства и недостатки намагничивания тороидальной обмоткой?
11. В чем заключается принцип индукционного намагничивания?
12. Какие условия надо соблюдать при намагничивании детали в соленоиде?

13. Какими вариантами можно обеспечить комбинированное намагничивание?
14. Для чего производят измерение характеристик магнитного поля?
15. Объясните физический принцип работы датчика Холла.
16. Можно ли контролировать детали, на которых нанесено немагнитное покрытие, и при каких условиях?
17. Что такое сухой способ?
18. В чем преимущества мокрого способа контроля?
19. Какие способы размагничивания вы знаете?
20. Какой способ размагничивания чаще всего используется в производственных условиях?
21. Почему над дефектом образуется неоднородное магнитное поле?
22. Какие силы действуют на частицу магнитного порошка в магнитном поле дефекта на объекте контроля?
23. Где на поверхности объекта собираются частицы магнитного порошка?
24. Как зависит искажение магнитного поля над дефектом при разной направленности дефектов относительно магнитного поля намагниченной детали?
25. Что такое магнитная коагуляция и как она влияет на перемещения порошка?
26. Что описывает закон электромагнитной индукции?
27. Как работает феррозондовый преобразователь?
28. Почему для феррозондового контроля используется нормальная составляющая магнитного поля?

29. Как изменяется нормальная составляющая магнитного поля над дефектом?

2.3. Методы акустического неразрушающего контроля

2.3.1. Классификация акустических методов НК

Акустическими методами НК называют методы контроля, основанные на применении упругих колебаний и волн в контролируемом объекте. По сравнению с другими методами контроля они обладают важными преимуществами: имеют высокую чувствительность к опасным внутренним дефектам типа трещин, инородных включений и других нарушений сплошности материала объекта контроля (ОК). Одна из основных причин широкого распространения акустических методов заключается в том, что свойства материалов, определяющие возбуждение и распространение механических колебаний, тесно связаны с прочностными характеристиками. В связи с этим основными задачами методов акустического НК являются:

- обнаруживать дефекты малых размеров (единицы микрон) в металлических и неметаллических материалах;
- выявлять дефекты нарушений сплошности, расслоений, трещин, инородных включений и др.;
- определять ориентацию, геометрические размеры и координаты выявляемых дефектов;
- оценивать физико-механические характеристики материалов (модули упругости, распределение температуры, твердость, зернистость и др.).

В настоящее время акустические методы НК получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. Более 50 % всех приборов неразрушающего контроля, выпускаемых в мире, являются акустическими (ультразвуковые дефектоскопы, приборы для измерения физико-механических и др. характеристик) [11].

На рисунке 2.3.1 приведена схема классификации акустических методов НК по ГОСТ 18353-79.



Рисунок 2.3.1 – Классификация акустических методов контроля по ГОСТ 18353-79 [11]

Акустические методы НК подразделяются на две большие группы:

- активные методы акустического НК;
- пассивные методы акустического НК (рисунок 2.3.2).

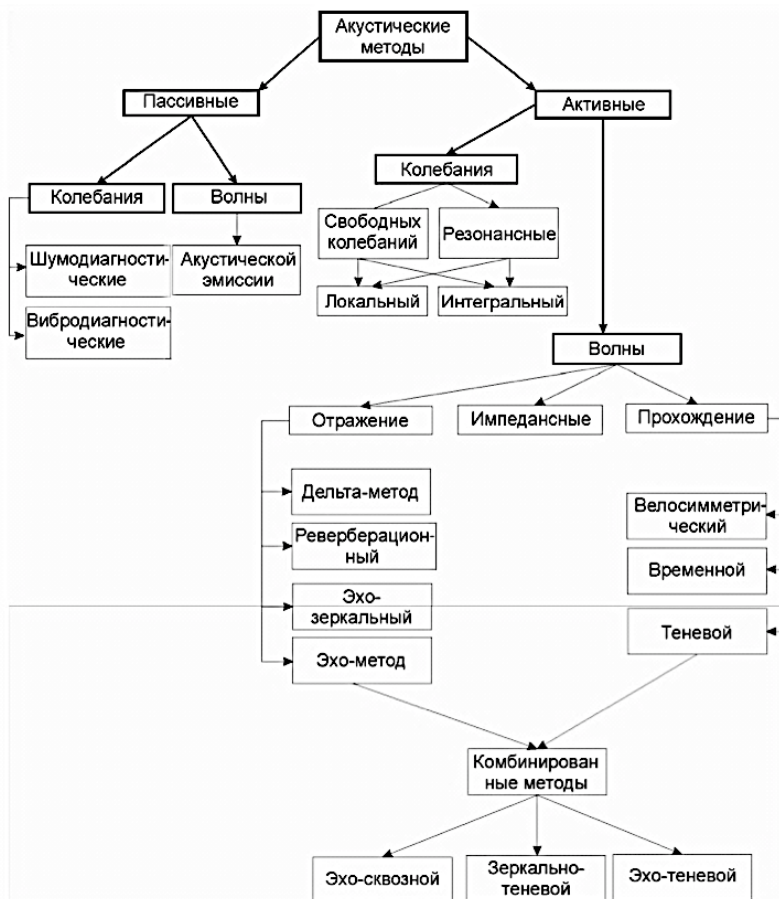


Рисунок 2.3.2 – Классификация акустических методов НК (ГОСТ 23829-79) [13]

Одна из групп классификации акустических методов НК использует излучение и прием акустических колебаний и волн (**активные методы**), вторая – только приём колебаний и волн (**пассивные методы**). В активных методах НК используются режимы излучения и приёма ультра-

звуковых (УЗ) колебаний (УЗК – свободных и резонансных в локальном или интегральном режиме), а в пассивных – только УЗ-режим приема вибро- и шумодиагностических колебаний [12–13].

Акустические методы НК бывают звуковыми (диапазон колебаний – 0,5 кГц до 20 кГц) и ультразвуковыми (диапазон колебаний – свыше 20 кГц) и классифицируются на виды:

1) *по характеру взаимодействия физических полей с объектом неразрушающего контроля:*

- теневой (зеркально-теневой);
- эхо-импульсный;
- резонансный;
- импедансный;
- метод свободных колебаний;
- акустико-эмиссионный;

2) *по характеру регистрации первичного информативного параметра:*

- амплитудный;
- частотный;
- спектральный.

2.3.2. *Группа методов ультразвукового контроля*

Ультразвуковой контроль (УЗК) – это обобщённое название группы методов неразрушающей диагностики ОК (материалов и изделий), без нанесения повреждений исследуемому предмету. Методы УЗК основаны на способности всех материалов проводить звук. Общий принцип

методов УЗК состоит в том, что в ОК вводится звуковой импульс, который распространяется в контролируемом материале ОК, отражается от границ ОК и внутренних нарушений сплошности материала, затем принимается для фиксации и трансформации в необходимый формат контроля. По параметрам принятого сигнала можно судить о наличии, месторасположении и размере несплошностей материала ОК, а также о физическо-механических свойствах самого материала ОК. Методы УЗК применяются для обнаружения дефектов в различных материалах (ОК из чёрных и цветных металлов и сплавов, а также пластиков.

2.3.2.1. Теневой метод акустического НК

В группу методов УЗК входит УЗ-дефектоскопия – это общее название группы методов УЗК, направленных конкретно на обнаружение и измерение параметров дефектов материала ОК. Для фиксации отражения распространяющихся в материале ОК колебаний УЗ-излучения, как правило импульсного, используют как один, так и два УЗ-пьезоэлектрических преобразователя (ПЭП) (рисунок 2.3.3) для генерирования и регистрации высокочастотных УЗ-колебаний при использовании метода прохождения (**теневого метода**) акустического контроля (АК), в частности. Электрические сигналы от генератора 1 поступают на ПЭП 2, где они преобразуются в акустические колебания и затем вводятся в контролируемое изделие. Прошедшие через изделие акустические сигналы поступают на приемный ПЭП 3, расположенный с противоположной стороны

изделия соосно с излучающим ПЭП. Сигнал, принятый датчиком 3, подается на вход приемника-анализатора 4. Непременным условием данного метода является соотношение $\lambda < d$, где λ – длина волны УЗ-звуковых колебаний, d – поперечный размер дефекта.

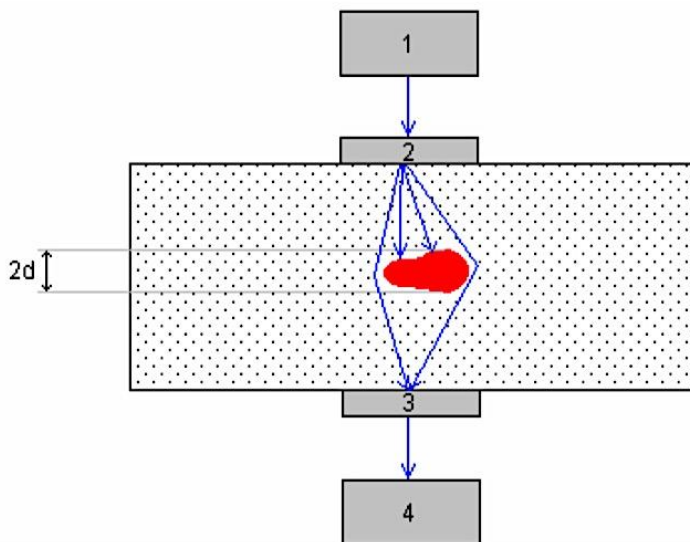


Рисунок 2.3.3 – Схема теневого метода АК [13]:
1 – генератор; 2 – электроакустический ПЭП;
3 – приемный ПЭП; 4 – приемник-анализатор

Информативный параметр теневого метода – амплитуда (A – несёт информацию о размере дефекта) или время прохождения сигнала (t – информирует о глубине расположения дефекта). Используемое излучение – непрерывное или импульсное. **Теневой метод** применяется главным образом для контроля качества листового проката

та, многослойных материалов, клееных изделий и др. Данный метод имеет высокую помехоустойчивость.

2.3.2.2. Эхо-метод акустического НК

К группе методов УЗ-дефектоскопии относится и **эхо-метод** акустического НК, основанный на регистрации эхо-сигналов от дефектов, в т.ч. при использовании одного ПЭП совмещённой разновидности, обеспечивающей излучение и приём УЗК (рисунок 2.3.4).

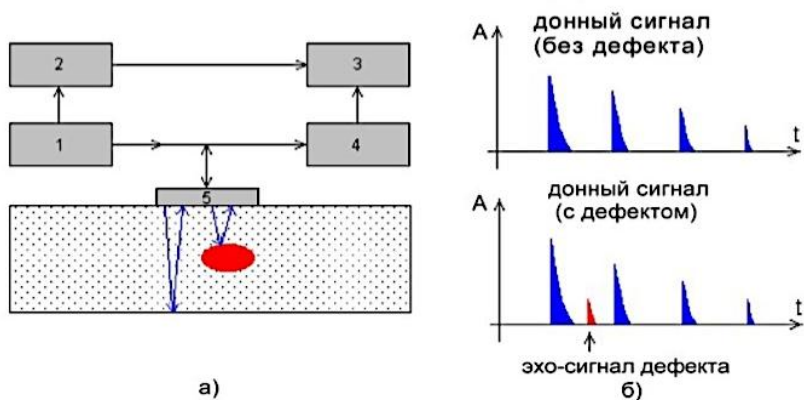


Рисунок 2.3.4 – Схема эхо метода АК [13]:

- а) 1 – импульсный генератор; 2 – генератор развертки; 3 – индикатор; 4 – усилитель; 5 – приемник сигнала;
- б) вид эхо-сигналов при отсутствии дефекта (рисунок сверху) и при наличии дефекта (рисунок снизу)

2.3.2.3. Эхо-зеркальный метод акустического НК

В **эхо-зеркальном методе** НК анализируются сигналы, испытавшие зеркальное отражение от донной поверхности контролируемого изделия и от дефекта (рисунок 2.3.5). Этот вариант акустического контроля рассчитан

на выявление вертикальных дефектов. Основное преимущество данного метода – высокая выявляемость плоскостных дефектов и возможность оценки их формы. Применим эхо-зеркальный метод для ОК больших толщин. **Его признак существования дефекта** – появление импульса на заданном участке развертки экрана дефектоскопа, **информативный параметр** амплитуды сигнала.

Для точного определения места расположения трещины требуется выполнение условия:

$$l_A + l_B = 2 H \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

где $l_A + l_B$ – расстояния от края дефекта до точек ввода луча преобразователей А и В соответственно; H – толщина объекта контроля; α – угол ввода луча.

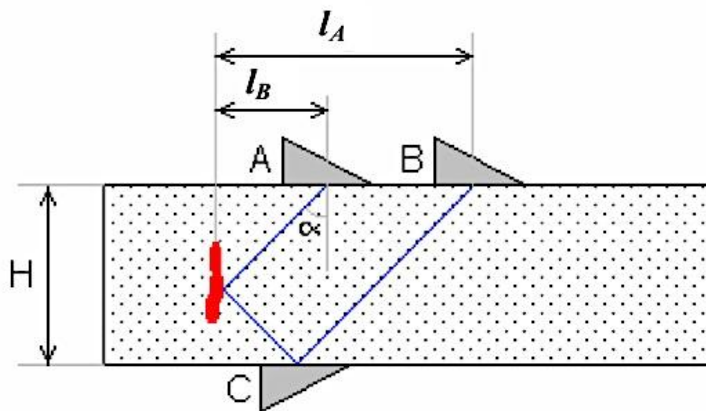


Рисунок 2.3.5 – Схема эхо-зеркального метода АК [13]: A , B , C – наклонные ПЭП, H – высота ОК, α – угол ввода луча, l_A и l_B – расстояния от дефекта до точки ввода луча преобразователей ПЭП A и B соответственно

Преобразователи А и В жестко закреплены и образуют так называемый тандем – механическое устройство, позволяющее обнаруживать вертикальные трещины. Если возможен двухсторонний доступ к объекту контроля, то используются преобразователи А и С (**К-метод**).

2.3.2.4. Дельта-метод акустического НК

Для выявления дефектов типа вертикальных трещин применяется также **дельта-метод** акустического НК (рисунок 2.3.6). Наклонный ПЭП 1 излучает расходящийся пучок поперечных волн t . На краях трещины за счет дифракционных эффектов возникают краевые продольные и поперечные волны, изотропно рассеивающиеся в пространстве.

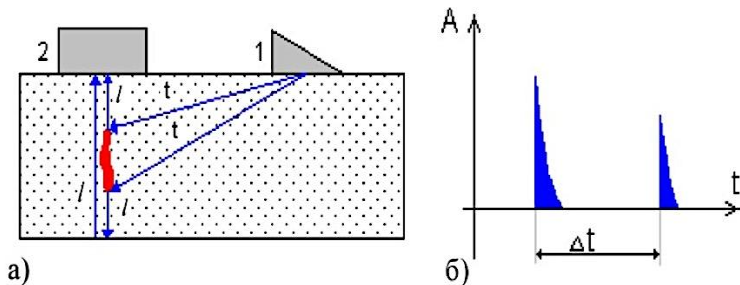


Рисунок 2.3.6 – Схема дельта метода АК [13]:

а) 1 – электроакустический ПЭП (наклонный); 2 – ПЭП приемный (нормальный); l и t – продольные и поперечные волны соответственно; б) вид эхо-сигналов, разделенных временной задержкой Δt

Информативные параметры: амплитуда продольной УЗ-волны (несет информацию об остроте краев трещины) и запаздывание импульса по времени (характеризует длину трещины).

Преимущества метода:

- метод выявляет дефекты – вертикальные трещины;
- возможность оценки месторасположения дефекта;
- возможность определить размер трещины.

2.3.2.5. Реверберационный метод акустического НК

Реверберационный метод НК основан на анализе времени объемной реверберации – процесса постепенного затухания звука в некотором объеме. На рисунке 2.3.7 представлена схема реализации реверберационного метода НК применительно к слоистому ОК, состоящему из трех слоев: металл, пластик и резина.

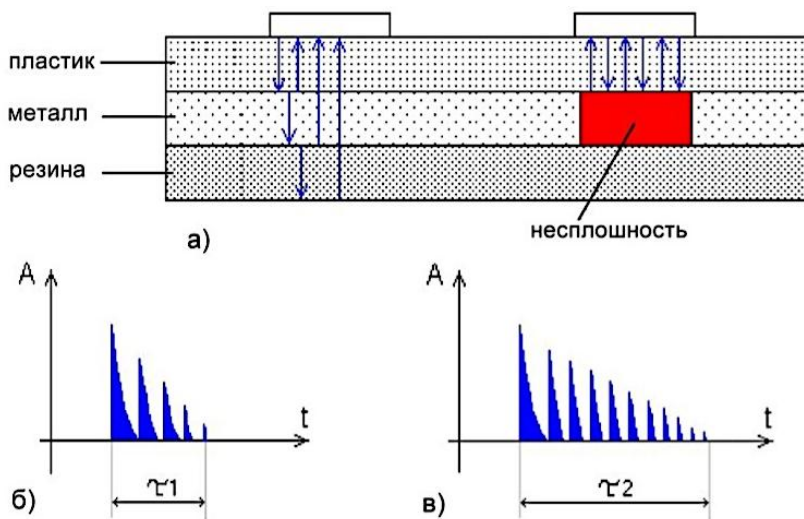


Рисунок 2.3.7 – Реверберационный метод АК [13]:

а) схема реверберационного метода; б) и в) вид осциллограмм ($\tau_1 < \tau_2$)

Этот метод считается индикаторным и эффективно применяется для контроля слоистых и композитных материалов.

Информативные параметры: время гашения ревербераций.

2.3.2.6. Импедансный метод акустического НК

Импедансный метод НК основан на анализе изменения механического или входного акустического импеданса участка поверхности контролируемого объекта, с которым взаимодействует преобразователь (рисунок 2.3.8).

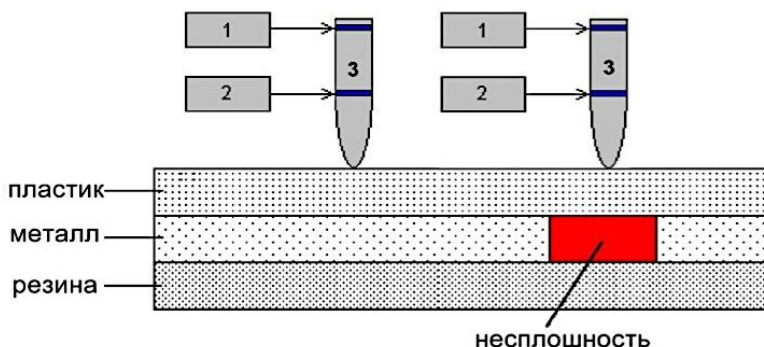


Рисунок 2.3.8 – Схема импедансного метода АК [13]:
1 – генератор; 2 – анализатор; 3 – колеблющийся стержень

Акустический импеданс Z_A определяется как отношение модуля акустического давления p к модулю колебательной скорости v , с которой элементы среды ОК совершают колебательные движения, или как произведение ρ плотности среды ОК и фазовой скорости U_3 -волны.

Механический импеданс Z_M вычисляется как отношение модуля приложенной силы к модулю колебатель-

ной скорости v . Акустический Z_A и механический Z_M импеданс имеют разные размерности:

$$[Z_A] = [\text{акустич. Ом}], [Z_M] = [\text{механич. Ом}].$$

Изменение входного импеданса механической системы может быть обнаружено по изменению амплитуды или фазы силы реакции, действующей на датчик, возбуждающий в ОК упругие колебания. На рисунке 2.25 показана принципиальная схема измерения импеданса по изменению амплитуды.

Датчиком является стержень, совершающий продольные колебания. Если стержень контактирует с участком (например, обшивкой, жестко склеенной с наполнителем), то вся конструкция колеблется как единое целое и импеданс системы наполнитель–обшивка–датчик определяется ее жесткостью. При этом сила реакции F ОК (изделия) на стержень будет значительной. Если же стержень расположен над дефектной зоной (непроклеен), то непроклеенный участок обшивки будет совершать колебания независимо от всей конструкции как зажатый по контуру диск. Так как жесткость обшивки значительно меньше жесткости рассматриваемой системы, то сила F резко уменьшится.

Импедансный метод позволяет обнаруживать зоны нарушения жесткой связи между элементами слоистых конструкций: непроклеи, непропаи, расслоения, слабую адгезию и т.д. Этим методом НК можно контролировать изделия как с плоскими, так и с кривыми поверхностями.

2.3.2.7. Метод свободных колебаний

Метод свободных колебаний основан на анализе частотного спектра свободных колебаний, возбуждаемых в контролируемом изделии (рисунок 2.3.9). Блоки 1–3, содержащие в своем составе генератор 1, вибратор 2 и приемник 3, предназначены для генерации, излучения и приема УЗ-волн, индикатор 5 относится к регистрирующей части дефектоскопа.

Сущность метода свободных колебаний заключается в следующем: если твердое тело, обладающее определенной массой, гибкостью и механическим сопротивлением, возбудить резким ударом, то в нем возникнут свободные (или собственные) затухающие колебания [13].

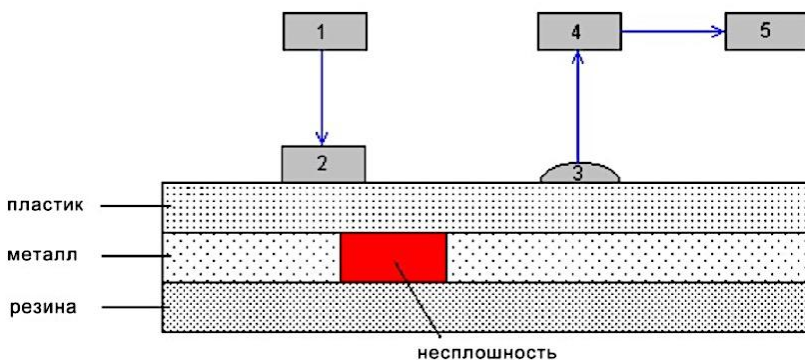


Рисунок 2.3.9 – Схема локального метода свободных колебаний АК [13]:

1 – генератор; 2 – вибратор; 3 – приемник;
4 – спектроанализатор; 5 – индикатор

При заданных размерах и форме ОК, однородности материала контролируемого изделия, из которого оно из-

готовлено, частота собственных колебаний является величиной определенной. При наличии дефекта параметры колебательной системы (гибкость, масса) изменяются, что ведет к изменению частоты собственных колебаний. Соответственно меняется и спектральный состав колебаний ОК (рисунок 2.3.10).

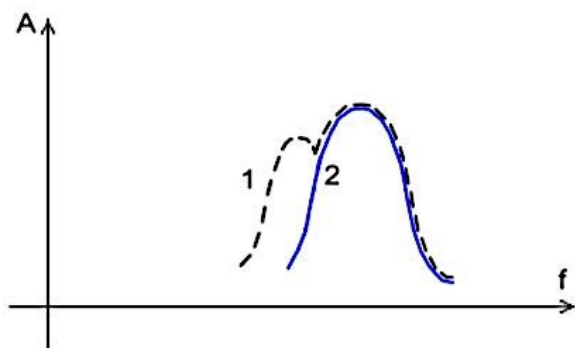


Рисунок 2.3.10 – Спектральный состав акустического сигнала в методе свободных колебаний [13]: изделие с дефектом (1) и без него (2)

Этот локальный метод – свободных колебаний АК позволяет выявить нарушения жесткой связи между слоями в слоистых конструкциях, а также внутренние дефекты в массивных изделиях.

2.3.2.8. Резонансный метод акустического НК

Резонансный метод акустического НК основан на возбуждении в изделиях постоянной толщины незатухающих УЗ-колебаний и определении частот, на которых имеют место резонансы этих колебаний (рисунок 2.3.11). Блоки 1–4 предназначены для генерации, излучения и приема

УЗК. Различие волн 5 и 6 обусловлено различными свойствами материала (в т.ч. геометрическими).

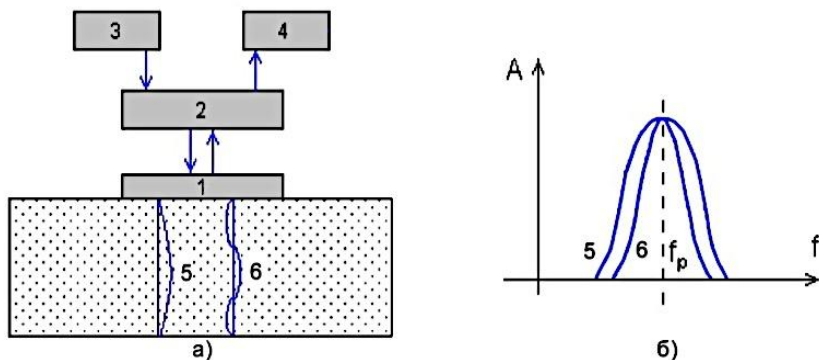


Рисунок 2.3.11 – Схема резонансного метода АК(а) и его АЧХ (б) [13]:

1 – преобразователь; 2 – генератор; 3 – модулятор;
4 – регистратор. Различие АЧХ 5 и 6 обусловлено свойствами материала (в т.ч. геометрическими),
 f_p – резонансная частота

Частота, при которой возникают стоячие волны, т.е. наступает резонанс, зависит от толщины ОК и скорости распространения в ней акустических волн. Таким образом, по фиксации момента установления резонанса определяют толщину контролируемой детали.

Условие резонанса для объекта толщиной h :

$$H = n\lambda / 2,$$

где n – целое число.

С помощью резонансного метода решают все три задачи неразрушающего контроля:

- выявление дефектов;

- измерение толщины;
- измерение физических свойств.

Ультразвуковой резонансный метод используют для обнаружения дефектов в виде коррозии или несплошностей материала, а также для измерения толщины листов, стенок труб, резервуаров и т.д.

2.3.2.9. Комбинированные методы акустического НК

В основу комбинированных методов акустического НК положены явления отражения акустической волны от дефекта и изменения параметров акустических сигналов при их прохождении через дефект.

К комбинированным методам относятся:

- зеркально-теневой метод;
- эхо-теневой метод;
- эхо-сквозной метод.

Зеркально-теневой метод акустического НК (рисунок 2.3.12) основан на измерении амплитуды донного сигнала. По технике выполнения этот метод является методом отражения (фиксируется эхо-сигнал), а по физической сущности контроля он близок к теневому методу (измеряется ослабление сигнала, дважды прошедшего контролируемое изделие в зоне дефекта).

Информативный параметр зеркально-теневого метода акустического НК – амплитуда донного сигнала. Критерием наличия дефекта при контроле методом зеркально-теневого акустического НК является уменьшение донного эхо-импульса.

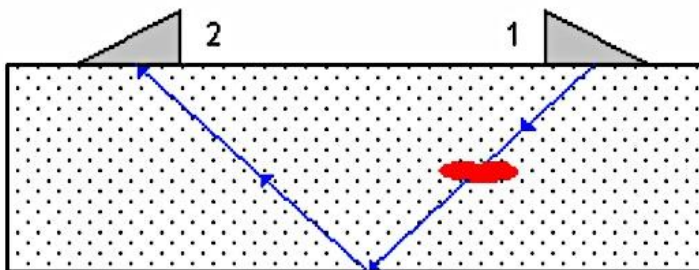


Рисунок 2.3.12 – Схема зеркально-теневого метода АК [13]:
1 – излучатель; 2 – приемник

К **недостаткам метода** зеркально-теневого акустического НК можно отнести:

- невысокую чувствительность к отдельным мелким дефектам;
- требование повышенной стабильности акустического контакта;
- шероховатость поверхности приводит к уменьшению достоверности результатов.

Эхо-теневой метод акустического НК (рисунок 2.3.13) основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн.

Информативные параметры:

- амплитуда сигнала;
- время прохождения.

Достоинства метода эхо-теневого метода акустического НК:

- большая вероятность обнаружения дефектов;
- возможность оценки характера дефектов.

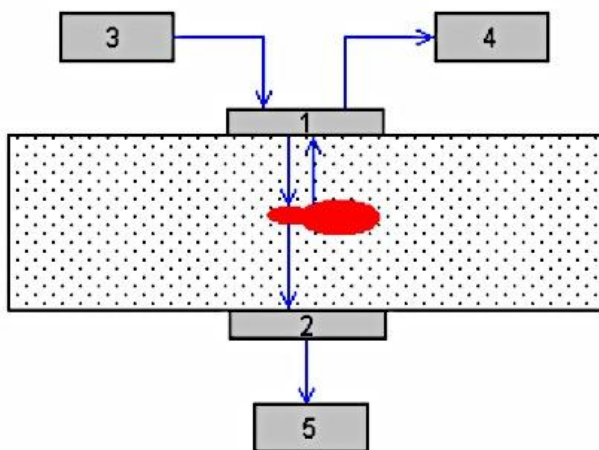


Рисунок 2.3.13 – Схема эхо-теневого метода АК [13]:
 1, 2 – излучающий и приемный преобразователи;
 3 – генератор; 4, 5 – приемник

Эхо-теневого метод акустического НК применяется при механизированном контроле сварных стыков труб.

Эхо-сквозной метод акустического НК (рисунок 2.3.14) использует набор полезных сигналов, прошедших через изделие. Его **информативный параметр** метода – амплитуда сигнала.

Сигналы I и II существуют всегда, они свидетельствуют о наличии крупных дефектов.

Сигналы III и IV свидетельствуют о существовании мелких дефектов. Недостатком метода является трудность определения местонахождения дефекта (один дефект – четыре сигнала).

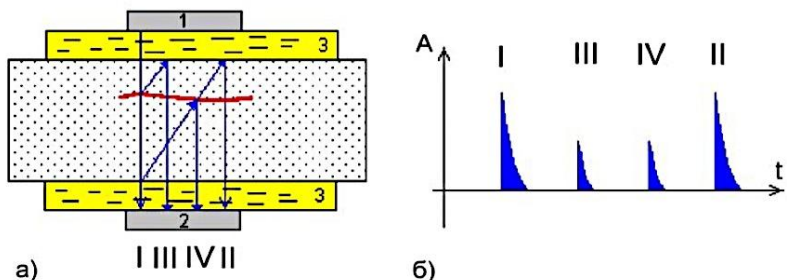


Рисунок 2.3.14 – Схема эхо-сквозного метода АК (а) и б) осциллограмма метода [13]:

1, 2 – преобразователь; 3 – слой жидкости. Сигналы I, II существуют всегда, они свидетельствуют о наличии крупных дефектов, сигналы III и IV свидетельствуют о существовании мелких дефектов

Преимущества эхо-сквозного метода акустического НК:

- повышенная чувствительность по сравнению с теневыми методами;
- время прихода сигналов не зависит от взаимных перемещений изделия по отношению к преобразователям;
- шероховатость поверхности ОК не сказывается на результатах контроля;
- отсутствие «мертвой зоны».

Дифракционно-временной метод (ToFD – Time of Flight Diffraction) основан на приеме волн, рассеянных на концах дефекта, причем могут излучаться и приниматься как продольные, так и поперечные волны. Практическое применение, однако, получил вариант, при котором излучаются и принимаются продольные волны (рисунок

2.3.15), поскольку они первыми приходят на приемник и по этому признаку их легко отличить от трансформированных волн.

Основными информационными характеристиками ToFD являются:

– время прихода сигнала, зная которое можно определить реальный размер несплошности;

– фаза первой полуволны сигнала от дифракции на краях несплошности, благодаря которой можно установить тип несплошности.

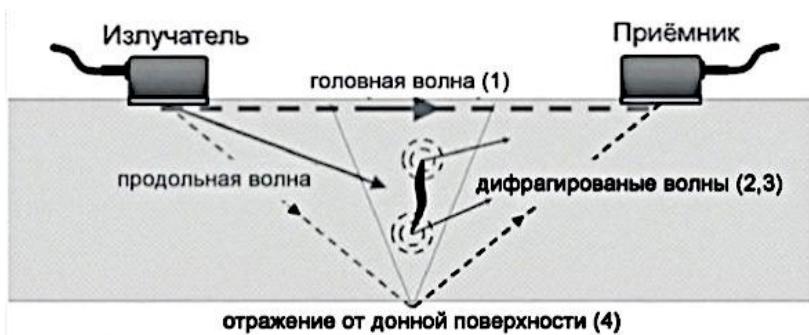


Рисунок 2.3.15 – Принцип ToFD [15]

Наиболее существенные отличия (*преимущества*) метода ToFD от стандартного эхо-импульсного метода:

1. Возможность достижения более высокой точности при проведении измерений, как правило, ± 1 мм, а при повторном обследовании – $\pm 0,3$ мм.
2. Независимость обнаружения дефекта от его углового положения.

3. Измерение параметров дефекта основано на времени прохождения пути дифракционных сигналов и не зависит от амплитуды сигнала.
4. Высокая производительность контроля, так как сканирование проводится вдоль одной линии с контролем всего объема шва.
5. Документирование и хранение результатов контроля.
6. 100 % воспроизводимость результатов контроля.
7. Изменение величины эрозии металла внутренней поверхности.
8. Альтернатива радиационному методу НК.

Дифракционно-временной метод ToFD применим, как правило, для материалов с относительно низкими уровнями затухания и рассеяния УЗ-волн. В большинстве случаев метод применим для нелегированных и низколегированных углеродистых сталей и сварных соединений, но также возможно его применение для мелкозернистых аустенитных сталей и алюминия. Крупнозернистые материалы и материалы со значительной анизотропией, такие как чугун, аустенитные сварные материалы и сплавы с высоким содержанием никеля, требуют дополнительной валидации и дополнительной обработки информации.

Методы прохождения в России чаще называемые теневыми, основаны на наблюдении изменения параметров прошедшего через ОК акустического сигнала (сквозного сигнала) и имеют следующие разновидности:

- амплитудный метод прохождения;
- временной метод прохождения;

- метод многократной тени;
- акустическая микроскопия;
- ультразвуковая томография.

На начальном этапе развития использовали непрерывное излучение, а признаком дефекта было уменьшение амплитуды сквозного сигнала, вызванное образуемой дефектом звуковой тенью. Поэтому термин «теновой» адекватно отражал содержание метода.

В дальнейшем применение рассматриваемых методов расширилось. Методы начали применять для определения физико-механических свойств материалов, когда контролируемые параметры (упругие постоянные, коэффициент затухания, плотность и т. п.) не связаны с образующими звуковую тень нарушениями сплошности. При этом в большинстве случаев непрерывное излучение было заменено импульсным. Существенно расширено также число информативных параметров сквозного сигнала, к которым, кроме амплитуды, добавились фаза, время прихода и спектр.

Таким образом, теновой метод может рассматриваться как частный случай более общего понятия «метод прохождения».

При контроле методами прохождения излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны ОК или контролируемого его участка. В некоторых методах прохождения преобразователи располагают с одной стороны ОК на определенном расстоянии друг от дру-

га. Информацию получают, измеряя параметры прошедшего от излучателя к приемнику сквозного сигнала.

Амплитудный метод прохождения (или амплитудный теневой метод) основан на регистрации уменьшения амплитуды сквозного сигнала под влиянием дефекта, затрудняющего прохождение сигнала и создающего звуковую тень. Для контроля этим методом можно использовать тот же импульсный дефектоскоп, который включают по отдельной схеме, причем излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны ОК.

Иногда применяют специализированные более простые по схеме приборы.

Временной метод прохождения (временной теневой метод) основан на измерении запаздывания импульса, вызванного огибанием дефекта. Информационным параметром служит время прихода сквозного сигнала. Метод эффективен при контроле материалов с большим рассеянием УЗ, например, бетона и т. п.

Метод многократной тени аналогичен амплитудному методу прохождения (теневому), но о наличии дефекта судят по амплитуде сквозного сигнала (теневого импульса) многократно (обычно двукратно), прошедшего между параллельными поверхностями изделия. Метод более чувствителен, чем теневой или зеркально-теневой, т. к. волны проходят через дефектную зону несколько раз, но менее помехоустойчив.

Для УЗ-контроля комбинированными методами – зеркально-теневым, эхо-теневым, эхо-сквозным и другими

акустическими методами применяют импульсный дефектоскоп, упрощенная блок-схема которого показана на рисунке 2.3.16.

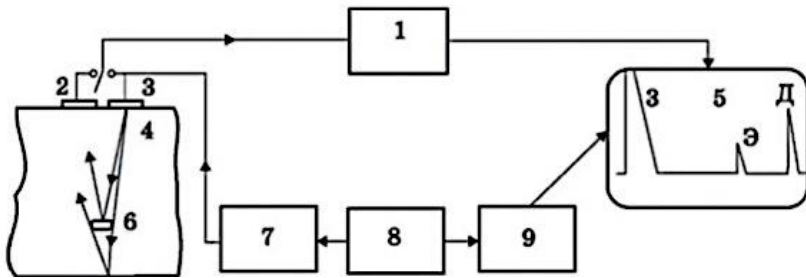


Рисунок 2.3.16 – Структурная схема эхо-дефектоскопа [12]

Генератор зондирующих импульсов 7 возбуждает короткие электрические импульсы. В преобразователе 3 они преобразуются в импульсы УЗ-колебаний, которые распространяются в ОК 4, отражаются от несплошности 6 и противоположной поверхности (дна) ОК, принимаются тем же (совмещенная схема включения) или другим (раздельная схема включения) преобразователем 2. Преобразователь превращает сигналы из УЗ в электрические. От него сигнал поступает на усилитель 1, а затем на экран 5 дефектоскопа.

Одновременно (а иногда спустя некоторый интервал времени) с запуском генератора импульсов начинает работать генератор развертки 9. Правильную последовательность включения их, а также других узлов дефектоскопа, не показанных на упрощенной схеме, обеспечивает синхронизатор 8.

Сигналы от генератора развертки вызывают горизонтальное отклонение светящейся точки на экране, а от усилителя – вертикальное отклонение. В результате экран УЗ эходефектоскопа отображает информацию двух видов: по горизонтальной линии развертки определяют длину пути импульса, а по вертикальной шкале оценивают его амплитуду. Такое изображение называют разверткой типа А (А-разверткой, А-сканом).

Устройство для измерения расстояния до дефекта, дна ОК или другого отражателя – глубиномер – измеряет время пробега импульса до отражателя и обратно, а это время пересчитывают в расстояние с учетом скорости распространения ультразвука в ОК.

Глубиномер предварительно настраивают на скорость распространения используемого типа волн в материале изделия и исключают время пробега в протекторе или призме преобразователя. При контроле наклонным преобразователем глубиномер позволяет измерять две координаты дефекта: глубину залегания его под поверхностью и расстояние от преобразователя до дефекта вдоль поверхности изделия. Для этого нужно предварительно настроить глубиномер и на измерение указанных величин с учетом угла ввода преобразователя, скорости распространения УЗ-колебаний и времени пробега УЗ-волн в акустической задержке.

С целью компенсации влияния затухания на амплитуду эхо-сигналов от одинаковых отражателей, расположенных на различной глубине, в дефектоскопе предусмот-

рено наличие блока временной регулировки чувствительности. Этот блок вырабатывает импульс экспоненциальной формы, за счет которого изменяется коэффициент усиления в зависимости от времени прихода сигнала.

Пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП)

Наибольшее распространение в акустических методах НК и диагностики получили пьезоэлектрические преобразователи (рисунок 2.3.17). Они являются обратимыми, то есть используются как для излучения, так и для приема упругих колебаний и волн.



Рисунок 2.3.17 – Пьезоэлектрический преобразователь [16]

Активным элементом преобразователя служит **пье-зоэлемент** [16]. Активный элемент (пьезоэлемент), изготавливаемый из пьезо- или сегнетоэлектрических материалов, преобразовывает электрическую энергию, подаваемую на него в виде электрического импульса возбуж-

дения от генератора, в энергию ультразвуковых колебаний (обратный пьезоэффект). Он также обеспечивает обратное преобразование энергии ультразвуковых колебаний в электрическую (прямой пьезоэффект). Для изготовления активных элементов зачастую используются поляризуемые керамические материалы, которые возбуждают волны различного типа (зачастую – продольные).

Демпфер ПЭП изготавливается из материала с высоким акустическим сопротивлением. Вследствие этого преобразователь имеет высокое внутреннее затухание и основная часть энергии излучается в направлении прозвучивания. За счет этого повышается разрешающая способность при некотором снижении амплитуды выходного сигнала. Если демпфер и активный элемент имеют близкие значения акустических импедансов, то в объект контроля будет излучаться только небольшая часть энергии и преобразователь будет иметь низкую разрешающую способность, а амплитуда излучаемого сигнала будет несколько выше.

Протектор ПЭП служит для защиты активного элемента от истирания. Для преобразователей контактного типа протектор должен изготавливаться из материала с высокой коррозионной и эрозионной стойкостью. Для иммерсионных, наклонных преобразователей и преобразователей с задержкой протектор дополнительно служит в качестве акустического трансформатора между активным элементом с высоким акустическим импедансом и водой, угловой призмой или линией задержки, имеющими низ-

кое акустическое сопротивление. Это условие выполняется путем обеспечения толщины протектора, равной примерно $1/4$ длины волны ультразвука, и соответствующим значением акустического импеданса (активный элемент обычно имеет толщину, равную примерно $1/2$ длины волны). Выбор толщины протектора основывается на идее конструктивной интерференции, что допускает прохождение волны, генерируемой активным элементом так, чтобы она была в фазе с волной, переотраженной в протектор.

В общем случае преобразователь может содержать один или несколько пьезоэлементов различной формы. Преобразователь, как самостоятельный функциональный узел прибора, обычно соединяют с электронным блоком гибким коаксиальным кабелем.

В простейшем случае используют один пьезоэлемент, выполняемый в виде пластины из пьезоэлектрического материала.

Для излучения упругих волн пьезоэлемент возбуждают электрическим напряжением генератора. Электрические сигналы, появляющиеся на пьезоэлементе при приеме упругих колебаний, подают на вход усилителя прибора.

Обычно при УЗ-контроле применяют ПЭП с пьезоэлементом в форме пластины (пьезопластины). Она имеет токопроводящие электроды на больших поверхностях. На электроды подают напряжение от генератора электрических колебаний или снимают сигналы, подаваемые на усилитель. Чтобы возбудить поперечные волны, можно заставить поверхности специально изготовленной пьезопласти-

ны колебаться в направлениях, перпендикулярных ее толщине, т. е. совершать сдвиговые колебания. Но такие колебания трудно передать в ОК: поверхность пластины будет проскальзывать относительно поверхности ОК и обычная контактная жидкость передать колебания не поможет. Преобразователь с такой пластиной приклеивают к поверхности ОК или используют очень вязкую контактную жидкость. В УЗ-дефектоскопии применяют более удобный способ возбуждения поперечных волн.

Продольную волну возбуждают в промежуточной среде – призме (чаще всего из плексигласа) и направляют на поверхность ОК наклонно. Угол падения должен быть таким, чтобы после трансформации на поверхности раздела сред в объект контроля попадала только поперечная волна. В результате в изделии распространяется наклонная к поверхности вертикально поляризованная поперечная волна. Такой преобразователь называют наклонным. Именно тот тип преобразователя используют при контроле сварных соединений, т.к. он позволяет осуществлять ввод ультразвуковых колебаний без снятия усиления.

Из пьезоматериалов наибольшее применение получил цирконат-титанат свинца [17]. Существуют различные марки ЦТС, отличающиеся химическим составом и свойствами. ЦТС – это синтетическая, спеченная из массы определенного химического состава, пьезокерамика. На поверхности изготовленных таким образом пластин наносят (краской, вжиганием или напылением) металлические (обычно серебряные) электроды. Далее пластины выдер-

живают длительное время под большим постоянным напряжением (поляризуют), чтобы материал приобрел пьезосвойства. Если температура пьезопластины из ЦТС-19 поднимется выше 290 °С (точка Кюри) пластина располяризуется, ее приходится поляризовать повторно. ЦТС обладает высоким коэффициентом электромеханической связи, но у него очень большая электрическая емкость. Это уменьшает чувствительность при приеме колебаний. Серийно изготовленные пьезопластины иногда имеют неравномерные свойства по всей поверхности.

Кварц – это кристалл, природный материал. Из него под определенными углами к оптическим осям вырезают пластины, способные деформироваться различным образом. Для возбуждения продольных волн применяют срез-пластины, совершающей колебания по толщине.

Для возбуждения поперечных волн срез-пластины применяют иногда. Кварц имеет небольшой коэффициент электромеханической связи, но обладает очень высокой добротностью и стабильностью свойств. Поэтому его применяют в случаях, когда надо обеспечить высокостабильные измерения с постоянными свойствами по всей поверхности пластины.

Основные типы преобразователей

Основные типы преобразователей представлены на рисунке 2.3.18: прямые (а); наклонные (б); раздельно-совмещенные (в).

Совмещенные преобразователи, в которых пьезоэлемент соединен одновременно с генератором и усили-

телом прибора, служат как для излучения, так и для приема УЗ. В раздельно-совмещенных преобразователях излучают и принимают УЗ разные элементы, соединенные один с генератором, а другой с усилителем прибора.

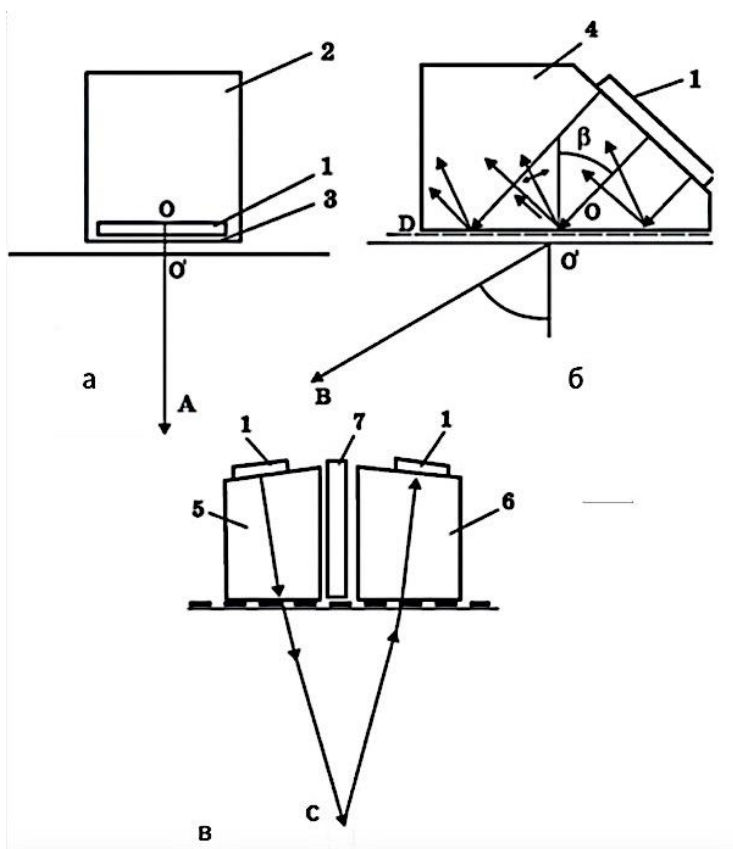


Рисунок 2.3.18 – Основные типы ПЭП [17]:

1 – пьезопластина; 2 – демпфер; 3 – протектор, предохраняющий пьезопластину от повреждений; 4 – преломляющая призма; 5, 6 – призмы раздельно-совмещенного преобразователя, 7 – электроакустический экран

Прямые преобразователи (ПЭП) излучают под прямым углом (рисунок 2.36, а), а наклонные – наклонно к поверхности ввода ОК (рисунок 2.36, б). На корпусе преобразователя отмечают точку выхода луча с максимальной амплитудой (стрела преобразователя). Прямые преобразователи излучают, как правило, продольные волны, наклонные – все типы волн в зависимости от угла наклона: поперечные, продольные (редко), релеевские, головные. Наклонный преобразователь с углом призмы между первым и вторым критическими значениями излучает в основном вертикально-поляризованную поперечную УЗ-волну. Кроме прямых и наклонных ПЭП есть ещё совмещенные и раздельно-совмещенные ПЭП. Совмещенные ПЭП могут как излучать, так и принимать УЗ-сигналы, а у раздельно-совмещенных (РС) ПЭП за это отвечают отдельных блока (рисунок 2.36, в) 5 и 6, разделённых акустическим экраном 7. Такое исполнение привлекательно минимальной мёртвой зоной. РС ПЭП внешне отличаются наличием двух разъёмов (по одному на каждый пьезоэлемент). Раздельно-совмещённые ПЭП могут быть как прямыми, так и наклонными (хордовыми). С хордовыми ПЭП очень эффективно выявлять вертикально-ориентированные продольные несплошности в трубопроводах малой толщины (3–8 мм) и наружного диаметра (до 325 мм).

Под огромное количество задач ультразвуковой дефектоскопии и толщинометрии сегодня выпускается множество самых разных ПЭП – общего назначения и специализированные. В первом случае речь идёт об универ-

сальных датчиках для стандартных задач УЗК. Пример – наклонный совмещённый П121-2,5-45-М-002 с диапазоном контроля по стали от 0,7 до 50,0 мм, который широко применяется для контроля сварных соединений трубопроводов и сосудов. К специализированным ПЭП относятся высокотемпературные (для нагретых поверхностей до 400, 600 или даже до 1000 °С обычно требуются специальные волноводы), миниатюрные (для стеснённых условий), низкочастотные иммерсионные и др. Для контроля изделий из композитов и сотовых конструкций применяются ударные преобразователи (например, УДп-60). Существуют датчики для УЗ-дефектоскопии резьбовой части бурильных труб, вагонных осей, с переменным углом ввода, для паянных, точечных сварных соединений и т.д.

По классификации ГОСТ Р 55725-2013 пьезоэлектрические преобразователи по способу акустического контакта разделяются только на 2 группы – контактные и иммерсионные. Последние, согласно ГОСТ Р ИСО 5577-2009 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковой контроль. Словарь», сконструированы специально для работы при полном либо частичном погружении в контактную жидкость. Контактные ПЭП либо непосредственно соприкасаются с объектом контроля, либо находятся от него на очень незначительном расстоянии (меньше половины длины волны в контактирующей среде). Для нормальной работы иммерсионного ПЭП между его «подошвой» и поверхностью необходимо нанести слой жидкости, толщина которого превышала бы пространственную протяжённость

акустического импульса (или несколько длин волны, по ГОСТ Р 55724-2013). Также в некоторых источниках выделяется категория контактно-иммерсионных преобразователей, рассчитанных на работу с так называемой локальной иммерсионной ванной [3].

Узкополосные ПЭП отличаются от широкополосных ПЭП тем, что имеют чётко выраженную резонансную частоту, при которой наблюдается максимальная амплитуда колебания пьезопластины. Узкополосные пьезоэлектрические преобразователи, как это явствует из названия, обладают узкой полосой пропускания. Речь идёт о диапазоне частот, в рамках которого колебания пьезоэлемента изменяются не более чем в 2 раза. У широкополосных датчиков, соответственно, полоса пропускания широкая, но явно выраженная резонансная частота отсутствует.

Фокусирующие ПЭП отличаются от нефокусирующих тем, что фокусирующие ПЭП способны сосредоточить акустическую энергию в узкой области, для чего у фокусирующих ПЭП предусматривают криволинейную пьезопластину (активный концентратор) или специальную линзу. К важным характеристикам фокусирующих ПЭП относятся фокусное расстояние, глубина и ширина фокуса. Чаще всего в неразрушающем контроле для поиска дефектов применяются нефокусирующие ПЭП, у которых нет элементов, присущих фокусирующим ПЭП. Фокусирующие ПЭП больше подходят для тщательного измерения характеристик отражателей, определения их морфологических и иных признаков.

Притёртые ПЭП – новые разновидности датчиков в стандартном исполнении с ровной «подошвой», отличающиеся тем, что проходят механическую обработку рабочей поверхности для более плотного контакта с цилиндрическим ОК (трубопроводом, сосудом). Это требуется, если наружный диаметр ОК меньше 400 мм (если он превышает ширину рабочей поверхности ПЭП менее, чем в 15 раз). Контактную часть притёртых ПЭП притирают по индивидуальным заказам – под конкретный диаметр.

Эргономика и удобство удержания датчика – круглым либо прямоугольным активным пьезоэлементом. Важна не только форма датчика, но и его эффективная площадь, от которой зависит ближняя зона (часть акустического поля, в которой оно изменяется немонотонно) и диаграмма направленности. Несплошности, которые находятся в пределах ближней зоны, сложнее зафиксировать, поскольку амплитуда обратного сигнала получается низкой. Сужение диаграммы направленности означает более высокую лучевую и фронтальную разрешающую способность, но сокращает прозвучиваемый объём. Что касается формы пьезоэлемента, то считается, что при одинаковой площади пьезоэлектрические преобразователи с прямоугольной пьезопластиной больше подходят для поиска несплошностей. С круглой пьезопластиной – для определения их характеристик и измерения условных размеров. Термином мёртвая зона обозначают подповерхностную область ОК со стороны установки УЗ-датчика, в пределах которой не удаётся выявить дефекты определённого раз-

мера. Фактическая мёртвая зона зависит от длительности электрического импульса, демпфирования пьезоэлемента, скорости распространения волны в материале, эквивалентной площади отражателя и пр. Мёртвую зону необходимо проверять после настройки чувствительности, например, по боковым цилиндрическим отверстиям диаметром 2 мм на глубине 3 и 8 мм в мере СО-2. Хотя не все НТД это предусматривают.

В классической ультразвуковой дефектоскопии большинство задач решаются при помощи прямых совмещённых (с продольными волнами), наклонных совмещённых (с поперечными волнами) и отдельно-совмещённых прямых (с продольными либо поперечными волнами) пьезоэлектрических преобразователей.

Помимо ПЭП для традиционного УЗК, отдельно имеются инновационные решения УЗ-технологий НК [3].

Фазированные антенные решётки (ФАР, ФР). Суть этой технологии в том, чтобы при помощи электроники управлять формой и ультразвуковым лучом (направлением распространения максимальной энергии волнового процесса) посредством акустического блока, в котором объединены множество пьезоэлементов. Фазированную антенную решётку ещё называют матричным преобразователем. Он обычно содержит от 16 до 256 последовательно возбуждаемых элементов. Каждый из них посылает сигнал по специально заданной схеме и с управляемой задержкой (по так называемому фокальному закону), при этом из отдельных компонентов луча формируется еди-

ный фронт волны, который распространяется в заданном направлении. Приёмник, соответственно, объединяет все эти сигналы от элементов в единую «картину» (развёртку). Дефектоскопы на фазированных решётках позволяют оператору менять угол луча, фокальное расстояние и размер электронного пятна. Всего один многоэлементный пьезоэлектрический преобразователь с призмой обеспечивает возможность секторного сканирования под разными углами, при этом его даже не обязательно перемещать по поверхности. Так работает функция мультиплексирования, и это очень удобно при обследовании объектов со сложной геометрией. Повышается выявляемость дефектов, точность измерения их размеров и координат. Резко увеличивается производительность УЗК. Главным недостатком фазированных решёток пока остаётся только стоимость. В остальном – это очень перспективное решение, которое уже благополучно применяется в различных отраслях, от нефтегазового сектора до атомной энергетики. Примеры фазированных ПЭП – раздельно-совмещённый 7.5DL32-32X5-REX1-P-2.5-OM-INC-RW для коррозионного мониторинга, 16-элементная антенная решётка 2L16-1.4x20-B17 от НПЦ «Кропус» и другие.

2.3.2.10. Пассивные методы акустического НК

Метод акустической эмиссии использует бегущие волны, которые излучаются самим объектом контроля в результате динамической внутренней перестройки структуры (рисунок 2.3.19). Процесс развития трещины сопро-

вождается сигналами акустической эмиссии, говорят «дефект трещит».

Источники акустической эмиссии:

- 1) возникновение и развитие микротрещины;
- 2) процессы пластической деформации (стадии предразрушения);
- 3) процессы коррозии;
- 4) процессы фазовых превращений (плавление, кристаллизация, полиморфные и мартенситные превращения и др.);
- 5) фрикционные явления (трение);
- 6) процессы намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков;
- 7) процессы электризации.

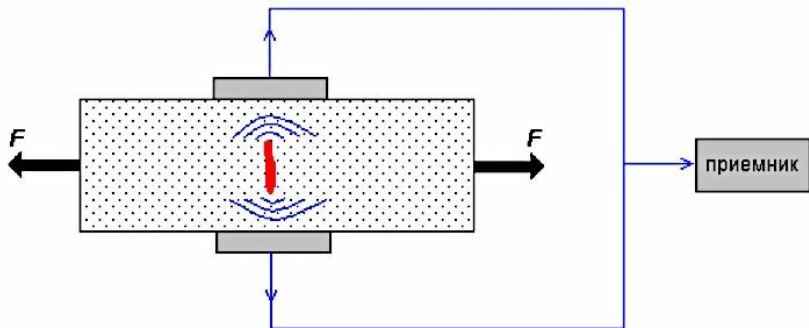


Рисунок 2.3.19 – Схема метода акустической эмиссии [13]:
 F – внешняя сила

Из вышеперечисленных источников акустической эмиссии процессы 4–7 чаще являются источником помех.

Информативные параметры акустической эмиссии (АЭ):

- суммарный счет N – число зарегистрированных импульсов АЭ, превышающих установленный порог за все время наблюдения;
- скорость счета N/t ;
- число импульсов, превышающих установленный порог в единицу времени;
- спектр частот;
- амплитуда сигнала A .

Приборы, использующие явление АЭ – компьютеризированные многоканальные приборы. Пример схемы, использующей явление АЭ для выявления развивающихся дефектов типа трещин в сосуде, приведен на рисунке 2.3.20.

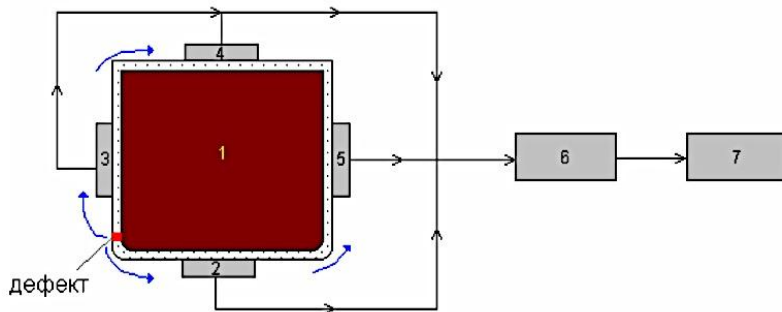


Рисунок 2.3.20 – Структурная схема метода АЭ [13]:
 1 – котел; 2, 3, 4, 5 – приемные преобразователи;
 6 – сумматор; 7 – анализатор

По разнице времени прихода сигнала от датчика определяют месторасположение дефекта.

Метод АЭ пригоден не только для контроля и диагностики, но и для исследований прочностных свойств ма-

териалов. В отличие от других методов при использовании метода АЭ имеется возможность наблюдения деградации материалов ОК, образования и увеличения размеров дефектов в реальном времени. В потенциале метода АЭ, который необходимо реализовывать, возможна оценка величины скачков трещин и их размеров [18]. Недостатком метода является повышенная чувствительность к помехам и шумам.

2.3.2.11. Способы осуществления акустического контакта

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

Бесконтактный метод. Акустические колебания в объект контроля передаются через слой воздуха. Данный метод контакта имеет пониженную чувствительность контроля, но его применение оправдано в следующих случаях:

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

Щелевой (менисковый) метод. Иммерсионная жидкость удерживается в зазоре между преобразователем и поверхностью объекта контроля силами поверхностного

натяжения (рисунок 2.3.21). В щелевом методе длина волны соизмерима с толщиной слоя $\lambda \approx h$.

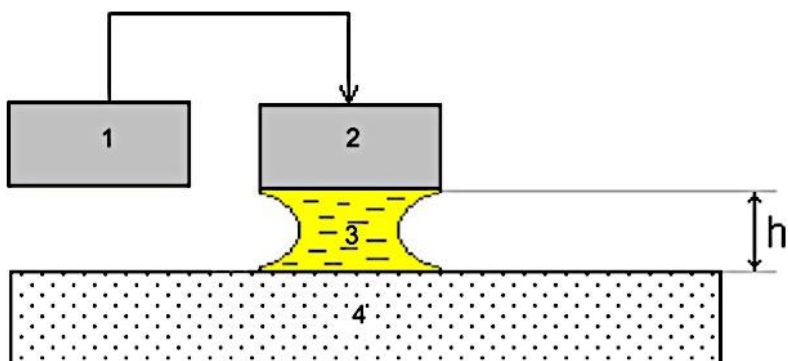


Рисунок 2.3.21 – Схема щелевого метода [13]

Контактный метод. Для обеспечения акустического контакта преобразователь должен быть плотно прижат к поверхности объекта контроля, смазанного жидкостью (например трансформаторным маслом) для сглаживания шероховатости. Толщина слоя контактной жидкости существенно меньше длины волны УЗК: $\lambda \gg h$.

Иммерсионный метод. Объект контроля погружается в иммерсионную жидкость целиком. Также возможно применение локальной жидкостной ванны. В этом случае толщина слоя жидкости – расстояние между преобразователем и поверхностью объекта контроля – существенно больше длины волны: $\lambda \ll h$.

Контактные среды должны соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать хорошую смачиваемость;

- иметь малое поглощение энергии акустических колебаний;
- быть экологически безвредными;
- не должны вызывать коррозию изделия.

2.3.2.12. Ультразвуковой инновационный метод НК с использованием фазированных решёток

УЗ-метод неразрушающего контроля с использованием преобразователей в виде фазированных решёток – инновационная технология (рисунок 2.3.22), которая предлагает новые варианты отображения данных ультразвукового контроля в виде различных типов разверток, называемых сканами, а также схем проведения контроля.

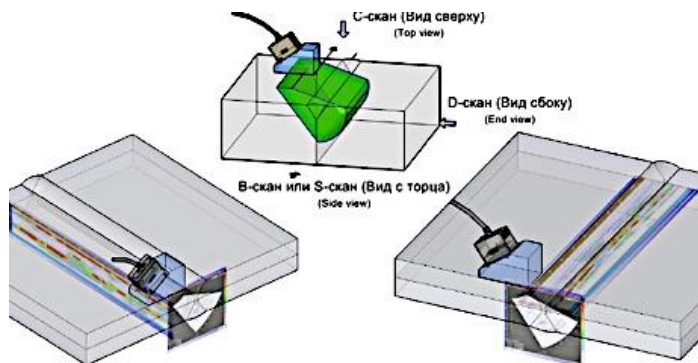


Рисунок 2.3.22 – Схема щелевого метода [14]

Аппаратура с использованием фазированных антенных решёток (Phased Array) расширяет возможности проведения УТ-контроля по сравнению с традиционным

настолько, что делает его вспомогательным, но не заменяет его.

В промышленности до последнего десятилетия применение ультразвуковой аппаратуры с использованием фазированных решёток находило достаточно ограниченное применение. Причиной стало отсутствие мощных портативных процессоров вычислительной техники, необходимых для быстрого возбуждения многоканальных преобразователей, а также необходимости в обработке большой информации, содержащейся в файлах, полученных при проведении сканирования.

Как при традиционном звуковом контроле, так и при контроле с использованием фазированных решёток используются те же основные законы физики, которые определяют распространение УЗ-волн. Например, если оптимальная частота проведения традиционного ультразвукового контроля принимается равной 5,0 МГц, то фазированные решётки, как правило, используют ту же самую частоту, фокусное расстояние и угол ввода.

У фазированных решёток есть главные преимущества перед традиционной УЗ-дефектоскопией:

1. Лучи могут быть развернуты в определенном диапазоне углов, управляться и фокусироваться.
2. Обеспечение проведения сплошного 100 % контроля участков путём непрерывного сканирования.
3. Документирование и архивизация результатов контроля в виде В, S, С и D – сканов с дальнейшей возможностью повторного их анализа.

4. Повышение вероятности обнаружения дефектов.

5. Вселяет большую уверенность в интерпретации Ложных индикаций.

6. Даёт больший объём информации за такое же отведённое время, как при проведении традиционного УЗ-контроля.

7. Даёт возможность проведения контроля в тех местах, которые ранее были недоступными или труднодоступными для проведения традиционного УЗ-контроля (рисунок 2.3.23).

8. Предлагается замена радиографии (RT) на УЗ.

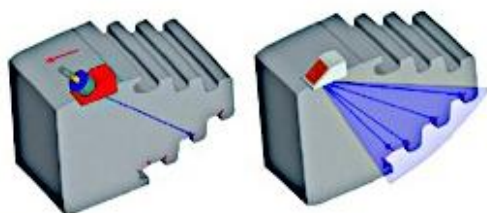


Рисунок 2.3.23 – Пример использования при УЗ-НК фазированных решёток [14]:

слева – традиционный УЗ-контроль вдоль одного направления луча; справа – с использованием фазированных решёток в широком диапазоне углов

2.3.2.13. Помехи и ложные сигналы при ультразвуковом НК сварных соединений

При проведении УК сварных соединений эхо-методом с применением одноэлементного ПЭП на экране УЗ-дефектоскопа помимо импульсов, отраженных от донной поверхности и несплошностей, могут появляться импульсы помех и ложных сигналов. Умение отличать эти импульсы

от полезных сигналов является важным практическим навыком, во многом определяющем повторяемость и достоверность УК. На рисунке 2.3.24 приведен пример наличия ложных сигналов в виде штрихпунктирных импульсов на экране УЗ-дефектоскопа от углубления 1, заполненного контактной жидкостью на поверхности ОК в примыкающей к сварному валику области [17].

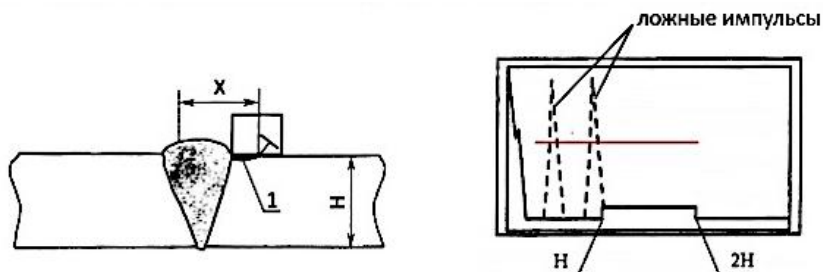


Рисунок 2.3.24 – Схема наличия ложных сигналов в виде штрихпунктирных импульсов на экране УЗ-дефектоскопа от заполненного контактной жидкостью углубления на поверхности ОК [17]:

1 – углубление; X – положение отражателя, выявленное по показаниям УЗ-дефектоскопа; H – толщина ОК

Ложные импульсы могут возникать, когда наклонный ПЭП наезжает на углубление, заполненное контактной жидкостью (рисунок 2.3.25).

Увеличенный зазор между ПЭП и ОК может (в зависимости от формы углубления на поверхности ОК) стать причиной возникновения ложного сигнала, соответствующего по времени прихода величине глубины 3–8 мм.

Когда значение координаты X попадает в сечение сварного шва, есть вероятность спутать данный импульс с

сигналом от несплошности. При контроле с другой стороны сварного шва сигнал не подтверждается, что свидетельствует о его природе, не связанной с наличием в ОК несплошности.

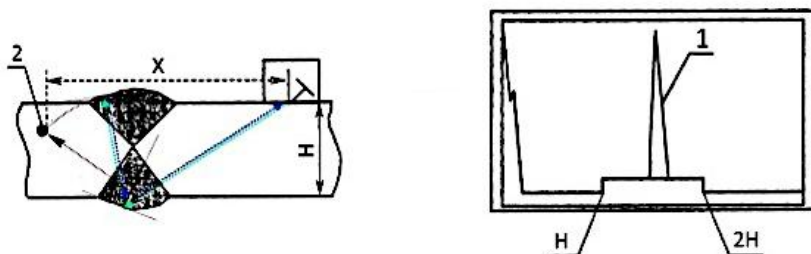


Рисунок 2.3.25 – Схема идентификации ложного сигнала от заполненного на контактной поверхности ОК жидкостью углубления после отражения от внутренней поверхности ОК [17]:

1 – ложный сигнал, испущенный ПЭП; 2 – «мнимый» дефект; X – положение отражателя, выявленное по показаниям УЗ-дефектоскопа; H – толщина ОК

В некоторых случаях (в зависимости от геометрической формы верхней и нижней поверхностей сварного шва) возможно получение эхо-сигнала 1 от верхнего усиления лучом, отраженным от внутренней поверхности сварного шва перпендикулярно верхнему усилению. Координата X «мнимого» дефекта 2 выходит за пределы сварного соединения.

Иногда при обнаружении дефекта раздельно-совмещенным (РС) ПЭП на экране дефектоскопа на некотором расстоянии за эхо-импульсом от дефекта возникают один или несколько импульсов помехи (рисунок 2.3.26).

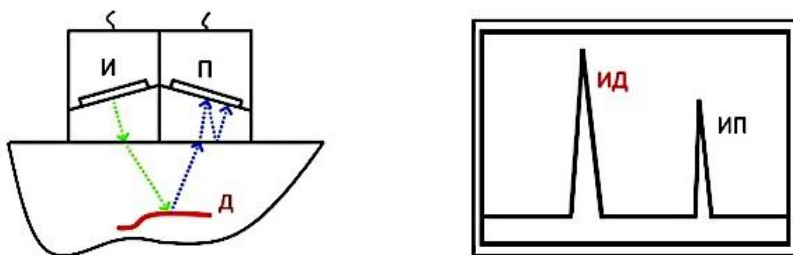


Рисунок 2.3.26 – Схема обнаружения ложного сигнала (импульса помехи) раздельно-совмещенным ПЭП на экране дефектоскопа на некотором расстоянии за эхо-импульсом от дефекта ОК [17]:

И, П – излучающий и приёмный пьезоэлементы РС ПЭП;
 Д – дефект; ИД – эхо-импульс, отражённый от дефекта Д;
 ИП – импульс помехи («мнимый» дефект ОК)

Одна из возможных причин образования импульса помехи заключается в следующем. Импульс, излученный пьезоэлементом И, отражается от дефекта Д, попадает на приёмный пьезоэлемент П, частично преобразуется в электрический импульс и даёт эхо-сигнал (ИД). Вместе с тем, часть электрического импульса отражается от пьезоэлемента П, возвращается на контактную поверхность ОК, отражается от нее, и опять попадает на приёмный пьезоэлемент П в виде импульса помехи (ИП). Таким образом, расстояние между ИД и ИП равно времени двойного прохождения ультразвука от пьезоэлемента П до контактной поверхности, умноженному на скорость распространения УЗ в ОК (задается при настройке дефектоскопа).

Положение ИП будет определяться маркой и износом протектора конкретного ПЭП. При подключении дру-

того РС ПЭП такой импульс может возникнуть, но на другом расстоянии от ИД.

В изделиях ограниченного объема с малым затуханием УЗ-колебаний возникает длительная реверберация (переотражение) УЗ-импульсов.

Если УЗ-колебания в ОК не успевают затухнуть за период следования зондирующих импульсов, то на экране УЗ-дефектоскопа будут фиксироваться импульсы как от текущей посылки, так и от предыдущих посылок в виде ложных импульс-сигналов – фантомов, попадающих из предыдущих посылок (рисунок 2.3.27), т.е. импульсы от предыдущих посылок могут отражаться от поверхностей раздела ОК, трансформироваться и достигать ПЭП (рисунок 2.3.28).

Ложные импульс-сигналы могут попасть в случайное место зоны контроля и будут восприняты как эхо-импульсы от несплошностей.

Чтобы отличить фантомы от сигналов от несплошностей необходимо в настройках используемого УЗ-дефектоскопа изменить частоту (период) следования зондирующих УЗ-импульсов. В этом случае создаются условия для того, чтобы импульс-сигналы помех (фантомы) изменили свое положение на экране УЗ-дефектоскопа. Уменьшить количество фантомов или избавиться от них полностью можно, увеличив период следования зондирующих импульсов.

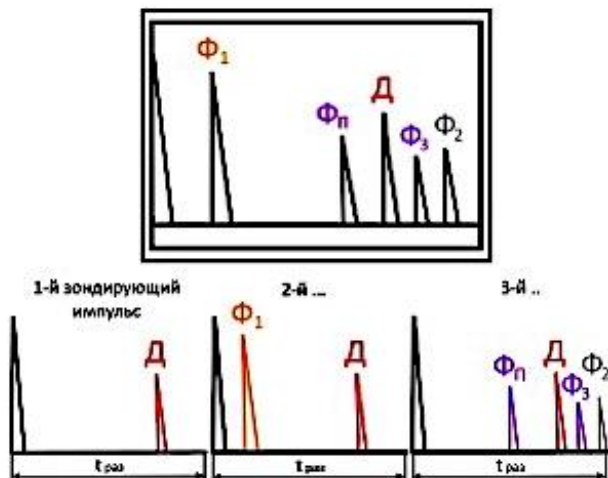


Рисунок 2.3.27 – Схема отражения на экран дефектоскопа ложных импульс-сигналов – фантомов Φ_n ОК [17]:

Φ_i – угловые отражатели; Д – дефект; Φ_n – фантом

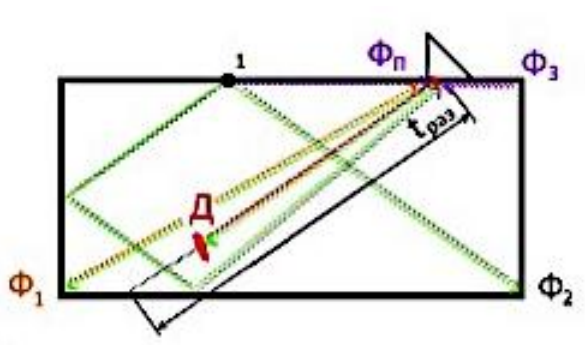


Рисунок 2.3.28 – Схема появления фантомов Φ_n – ложных импульс-сигналов вследствие угловых отражений [17]:

Φ_i – угловые отражатели; Д – дефект; Φ_n – фантом,

связанный с появлением поверхностной волны в точке 1

Смещение кромок из-за несоосности труб характеризуется появлением эхо-сигналов при прозвучивании с

разных сторон шва в диаметрально противоположных точках. При этом, как правило, сигнал от дальней стороны корня шва имеет значительную амплитуду и изменяет свою форму при перемещении ПЭП вдоль шва (это объясняется неравномерной формой корня шва), что вызывает появление ложного импульса помехи (рисунок 2.3.29).

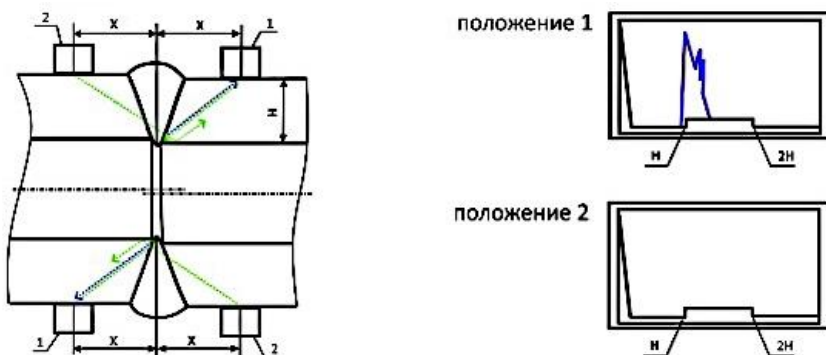


Рисунок 2.3.29 – Схема появления ложных импульсов помехи из-за вызванных несоосностью смещений кромок стыкуемых труб при сварке [17]:

1, 2 – положения ПЭП, при которых фиксируется и отсутствует отраженный сигнал соответственно

Смещение кромок стыкуемых труб при сварке может привести к появлению непровара по одной кромке, расположенной ближе к центру. Тогда левее эхо-сигнала от дальней стороны корня шва на экране УЗ-дефектоскопа появится эхо-сигнал от непровара (рисунок 2.3.30).



Рисунок 2.3.30 – Идентификация эхо-сигнала от непровода по кромке шва при наличии смещения [17]:

1 – положение ПЭП

Идентифицировать сигнал от непровода по кромке, который возникает из-за смещения можно путем точной оценки расстояния до отражателя и учёта того, что амплитуда эхо-импульса от непровода будет больше и равномернее амплитуды эхо-импульса от дальней стороны корня шва.

При работе с наклонными ПЭП могут возникнуть вызванные поверхностными волнами (ПВ) импульсы помехи, которые особенно часто возникают при углах 70° и больше (рисунок 2.3.31). Отражаясь от рисок, царапин, подрезов, брызг расплавленного металла, неровностей усиления сварного шва, ПВ дает эхо-импульс (справа на экране УЗ-дефектоскопа). При перемещении ПЭП положение этого ложного импульса будет изменяться. Происхождение таких импульсов легко установить, если провести пальцем по поверхности ОК непосредственно

перед ПЭП. При пресечении направления распространения ПВ эхо-импульс от нее будет резко падать. Таким же образом можно определить и конкретное место, от которого отражается ПВ: до этого места амплитуда эхо-импульса прощупывается, после него – нет.

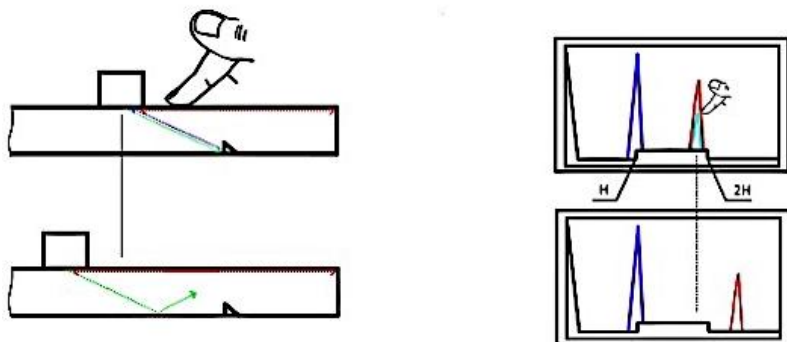


Рисунок 2.3.31 – Схема возникновения ложных сигналов из-за распространения в ОК поверхностных УЗ-волн [17]:
1 – положение ПЭП

Общим способом для удаления импульсов помех, вызванных ПВ, является механическая зачистка поверхности объекта контроля.

2.4. Вихретоковый метод неразрушающего контроля

Вихретоковый метод НК основан на анализе взаимодействия электромагнитного поля объекта контроля (ОК) с электромагнитным полем вихревых токов дефектоскопа. В качестве источника электромагнитного поля чаще всего используется вихретоковый преобразователь (ВТП), как правило, с индуктивной катушкой.

Вихретоковый метод дефектоскопии заключается в том, чтобы при помощи вихретокового дефектоскопа и ВТП наводить в ОК индукционные (вихревые – токи Фуко) токи, электромагнитное поле которых рассеивается на участках с дефектами. Электродвижущая сила (ЭДС) этого поля воздействует на катушку (у резонансных, или однокатушечных ВТП) или катушки (у многообмоточных ВТП) вихретокового преобразователя. Дефектоскоп фиксирует напряжение этого поля (сопротивление на катушках) и отображает результаты в виде временной развёртки (графиков) либо комплексной плоскости с применением секторных и/или круговых масок для более наглядной визуализации сигналов. Вихревые токи являются замкнутыми электрическими токами в проводнике (ОК), возникающими при изменении магнитного потока, который его пронизывает [20].

Главное преимущество вихретокового метода – его высокая чувствительность, а также минимальное влияние на ОК, в отличие, например, от капиллярного метода, поэтому метод активно применяется для технического диагностирования сложных технических устройств.

Вихретоковый метод – один из видов НК, предназначенный для выявления поверхностных и подповерхностных несплошностей в изделиях из чёрных и цветных металлов (стали, титана, алюминия), а также из углепластиков и композиционных материалов. Данный метод способствует выявлению трещин, пор, волосовин, шлаковых и иных неметаллических включений в основном металле

объектов контроля, а также в клепаных, болтовых и сварных соединениях со снятым усилением и шероховатостью поверхность $\leq Ra 2,5$ мкм (таблица 2.4.1) [20].

Таблица 2.4.1

Типы и параметры объектов контроля

Задача	Типы дефектов	Параметры
Выявление несплошностей	Трещины, поверхностные расслоения, другие протяженные дефекты	Длина, глубина, ширина раскрытия, местонахождение
	Подповерхностные раковины	Глубина залегания, протяженность или площадь, местонахождение
	Поверхностные и подповерхностные пористости и рыхлоты	Протяженность, площадь, глубина, местонахождение
Измерение толщины	Несоответствие толщины металла	Толщина металла, координаты отклонения
	Несоответствие толщины покрытия	Толщина покрытия координаты отклонения
Оценка величины структурных параметров и механических характеристик металла	Недостаточное или избыточное содержание химического элемента	Количество химического элемента
	Недостаточная или избыточная твердость	Твердость
	Недостаточный предел прочности	Предел прочности

Помимо дефектоскопии, вихретоковый метод НК позволяет решать и другие задачи, например, по измерению толщины немагнитных покрытий, определению электропроводимости чёрных и цветных металлов, сортировке металлопроката и пр. Вихретоковый контроль активно применяется в нефтехимической, газовой, авиастроительной и авиаремонтной отрасли, судостроении, теплоэнергетике, металлургии, автомобилестроении, энергомашиностроении, в железнодорожном хозяйстве, на производст-

вах ёмкостного оборудования, строительных металлоконструкций, мостовых сооружений и пр.

2.4.1. Физические основы вихретокового метода НК

Для лучшего понимания физики процесса представим вихретоковый контроль в виде такой последовательности [19]:

1) при помощи ВТП, внутри которого одна или несколько катушек, на ОК подаётся импульсный либо синусоидальный ток;

2) вследствие этого создаётся электромагнитное поле;

3) под действием этого происходит возбуждение вихревых токов;

4) их собственное электромагнитное поле воздействует на катушки ВТП, изменяя их сопротивление, либо наводит на них ЭДС;

5) дефектоскоп (или иной прибор) регистрирует сопротивление и напряжение на катушках ВТП;

6) на основании корреляционной связи между изменениями этих величин и исследуемыми параметрами оператор получает необходимую информацию об ОК.

Область применения вихретокового метода контроля – ферромагнитные и неферромагнитные стали, графиты, а также цветные сплавы, чья удельная электрическая проводимость составляет $\geq 0,5\text{--}60$ МСм/м. При этом для достижения большей достоверности результатов материалы ОК должны обладать однородными магнитными свойствами. На чувствительность также влияет проводи-

мость материала ОК, его размеры, геометрия, взаимное расположение ВТП и контролируемой поверхности, её шероховатость, наличие и состояние покрытия, наличие коррозии (поражённые ею участки нужно зачищать до неповреждённого металла).

Считается, что ручной вихретоковый метод НК способен выявлять выходящие на поверхность трещины с шириной раскрытия не менее 0,01 мм, глубиной $\geq 0,1$ мм и длиной $> 2,0$ мм. При этом плоскость раскрытия несплошностей должна быть параллельна контролируемой поверхности либо составлять с ней угол $< 10^\circ$. Данный вид вихретокового метода НК широко используется для контроля труб, галтелей, балок, лопастей турбин и винтов, прутков, поковок, литья, подшипников, корпусов атомных установок, деталей подвижного состава и пр. В авиационной отрасли технологию успешно применяют для диагностики многослойных композиционных материалов. Основные понятия в области вихретокового метода НК описаны в ГОСТ Р 55611-2013. Примеры руководящих документов – РД 13-03-2006, ГОСТ Р ИСО 15549-2009, РД 32.150-2000 и др.

2.4.2. Разновидности и задачи вихретокового метода НК

В зависимости от подвижности/неподвижности ОК предусмотрены динамический и статический режимы. Контроль также бывает ручной (с портативным дефектоскопом или структуроскопом) и механизированным (вы-

полняется стационарными автоматизированными установками).

Методов вихретокового НК довольно много, но наибольшее распространение получили:

- амплитудный (измеряется амплитуда сигнала ВТП);
- фазовый (измеряется фаза сигнала);
- амплитудно-фазовый (измеряется проекция вектора напряжения ВТП на направлении отстройки, то есть подавления мешающего фактора).

Существуют ещё частотный, многочастотный, импульсный, переменно-частотный, модуляционный методы и пр.

Вихретоковый метод НК позволяет решать широкий спектр задач, связанных с техническим диагностированием, а именно:

- обнаруживать поверхностные и подповерхностные неслышимости. Данный метод эффективен для поиска усталостных, ковочных, шлифовочных, штамповочных трещин, надрывов, волосовин, пор, посторонних включений;
- измерять толщину покрытий, а также толщину отдельных слоёв многосоставных материалов;
- измерять электропроводимость и/или проницаемость материала ОК;
- производить сортировку материалов по тем или иным магнитным свойствам;
- выявлять остаточные напряжения;
- оценивать качество химической, термической, механической обработки и пр.

Вихретоковый метод НК применяется как в ручном режиме, с применением классических датчиков, так и в автоматическом режиме – с использованием специальных сканирующих устройств. НК вихретоковым методом проводят на производствах, в цеховых, а также в полевых условиях.

При выполнении НК вихретоковый метод, как одно из направлений дефектоскопии, привлекателен тем, что:

- не предполагает контакта с поверхностью ОК, на которой не остаётся никаких следов. ВТП с корундовыми наконечниками изнашиваются очень медленно;

- не нуждается в подводе и удалении контактной жидкости;

- позволяет эффективно выявлять выходящие на поверхности трещины глубиной от 0,1 мм, длиной от 2 мм и с шириной раскрытия 0,01 мм и более;

- отлично подходит для автоматизированного входного и выходного контроля продукции и материалов;

- может проводиться даже при наличии лакокрасочных материалов, т.е. ему, как правило, не мешает наличие немагнитного покрытия толщиной до 2 мм;

- подходит как для основного металла ОК, так и для всевозможных соединений – болтовых, клёпанных и сварных. В последнем случае, правда, нужно предварительно снять валик усиления;

- не нуждается в расходных дефектоскопических материалах;

- безвреден для здоровья дефектоскописта;

– может применяться для подвижных ОК. Он активно используется в условиях поточного трубопрокатного и литейного производства, для проверки цилиндрических поверхностей по мере формирования отверстий и т.д.

Наряду с достоинствами вихретоковый метод НК не безупречен, поскольку:

– не пригоден для объектов с неоднородными магнитными и электрическими свойствами. Наличие прижогов, наклёпа и местной намагничённости приводит к локальным изменениям, которые, в свою очередь, провоцируют возникновение ложных индикаций;

– не способен выявлять дефекты, заполненные электропроводящими частицами, а также несплошности, плоскость раскрытия которых параллельна исследуемой поверхности (либо образует с ней угол менее 10 градусов);

– может не показать имеющиеся несплошности на ОК с токопроводящими покрытиями. То же самое касается изделий, поражённых коррозией. Он хорошо распознаёт дефекты, выходящие на поверхность. Если этого не наблюдается, то технология вихретокового НК оказывается бесильной;

– обладает сравнительно малой глубиной исследуемой зоны, обычно до 2 мм. Это, конечно, не рентген и не УЗК.

2.4.3. Особенности вихретокового метода НК

Нормы требований к ВТП подчинены регламенту ГОСТ 23048-83, одно из ключевых которых – высокое соот-

ношение сигнал/шум. ВТП подразделяются на несколько типов:

- по способу получения информации – абсолютные и дифференциальные. В первом случае выходные значения сигналов считываются напрямую с измерительной катушки ВТП. Дифференциальные датчики ВТП состоят из двух катушек: одна в зоне контроля, другая – на бездефектном участке, вследствие чего в процессе измерений учитывается разница между их показаниями. Благодаря этому увеличивается чувствительность и помехоустойчивость контроля;

- по характеру взаимодействия с ОК – накладные, проходные и комбинированные. Накладные датчики ВТП располагаются на нём и используются при одностороннем доступе. Проходные – помещаются внутрь (для полых изделий контроля – труб, сосудов, кожухов, колец и пр.). Либо наоборот, обхватывают ОК (это так называемые наружные проходные датчики). Комбинированные датчики ВТП могут работать в разных пространственных положениях. Бывают ещё роторные, карандашные и многие другие;

- по способу преобразования параметров – трансформаторные и параметрические. Последние проще и дешевле, но в большей степени зависимы от температурных условий.

Если радиус кривизны ОК < 5 мм, то для работы с ВТП дополнительно используются позиционирующие насадки.

Информацию, полученную при помощи ВТП, нужно фиксировать и обрабатывать. Для этого и нужны дефектоскопы (рисунок 2.4.1).

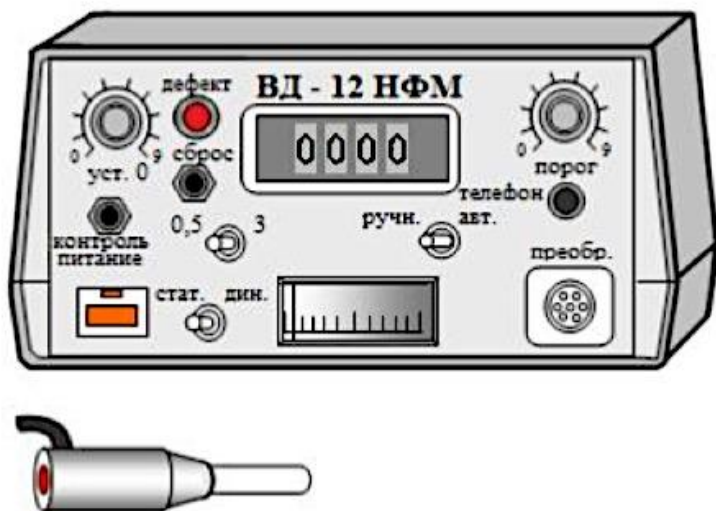


Рисунок 2.4.1 – Внешний вид дефектоскопа ВД-12НФМ [20]

Любой дефектоскоп, как правило, содержит [20]:

- генератор синусоидальных или импульсных сигналов, подаваемых на обмотку возбуждения (параметры сигналов могут варьироваться, а у специализированных дефектоскопов для контроля конкретных деталей могут быть установлены неизменными);

- усилитель сигналов измерительной обмотки, при этом иногда дополнительно используется схема автоматической регулировки усиления;

– фильтр для выделения необходимых составляющих спектра сигнала;

– компаратор – устройство сравнения измеряемого параметра с задаваемым на нем пороговым значением;

– аналого-цифровой преобразователь с дальнейшей обработкой информации микропроцессором и сохранением в электронном виде (в современных приборах).

Отстройка от мешающих факторов приводит к встраиванию в дефектоскоп необходимых элементов для измерения: фазы – фазового детектора, амплитуды – амплитудного детектора. Для настройки приборов с реализованным фазовым или амплитудно-фазовым методом отстройки используется фазовращатель.

При решении более специализированных задач или для повышения качества обработки сигналов в схему прибора могут встраиваться другие элементы электроники и автоматики.

Дефектоскопы могут предназначаться для ручного и/или автоматизированного вихретокового НК. Примеры из первой категории – ВД-10А, «ЗОНД ВД-96», ВД-70, ВД-100, NORTEC 600, OmniScan MX ECA/ECT, Eddyfi Reddy, ВД-12НФП, ВД-20НФ, ВД-41П, ВД-90НП и др. Некоторые приборы для ручного вихретокового НК совмещают в себе реализацию и других методов – чаще всего импедансного (акустического). К таким комбинированным дефектоскопам относятся «Вектор-50», УДЗ-307ВД, «ВЕКТОР-СКАН», «Томографик» УД4-ТМ, ДАМИ-С09, УД2-102ВД и пр.

При выборе конкретного прибора нужно учитывать порог чувствительности, доступные методы (амплитудный, фазовый и др.), конфигурацию объекта и пр.

Ещё одна категория оборудования для вихретокового НК – это толщиномеры и толщиномеры покрытий. Примеры – МВП-2М, Sedge-42, «Константа К5». При рассмотрении той или иной модели исходить нужно из ключевых характеристик – диапазона измерений и погрешности показаний.

Примеры вихретоковых структуроскопов – «ВИХРЬ 2К», ВЭ-26НП. Приборы этого типа позволяют оценивать физико-механические качества материалов – предел прочности, твёрдости, проницаемость, глубину закалки и т.д. На основании эмпирической корреляционной зависимости исследуемых параметров с магнитными и электрическими характеристиками можно судить о состоянии материалов, производить отбраковку, сортировку и т. п.

И ещё, согласно РД 13-03-2006, требуются для вихретокового НК следующие технические средства:

- контрольные образцы искусственных дефектов и зазоров (КОИДЗ-ВД). Изготавливаются из тех же материалов, что и объект контроля, в виде плоских либо изогнутых пластин, цилиндров и пр. К образцам обязательно прилагаются паспорта;

- осветительные приборы. Дополнительно к местному освещению (от 500 до 1000 лк) понадобятся переносные светильники с рабочим напряжением 12, 24 или 36 В. Такие устройства в обязательном порядке комплектуются

крепёжными приспособлениями для фиксации в заданном положении;

- ветошь и другие принадлежности для очистки поверхности;

- заземляющие шины и подводки напряжений 12 и 36 В, а также однофазной сети переменного тока (220 В).

Все средства измерения, которые задействуются для проведения вихретокового НК подлежат регистрации в Госреестре и должны проходить периодическую поверку и калибровку. Документация, подтверждающая факт своевременного метрологического обслуживания, подлежит обязательному хранению.

Для проведения вихретокового НК допускаются специалисты, аттестованные на I, II или III квалификационные уровни в соответствии с СДАНК-02-2020 или СНК ОПО РОНКТД-02-2021, и имеющие квалификационное удостоверение с не истекшим сроком действия.

2.4.4. Основные функции и настройки вихретокового метода НК

Вихретоковый метод НК является многопараметровым. С одной стороны, это дает возможность определять искомые дефекты и измерять их характеристики, значимые для контролируемого объекта, в соответствии с требованиями к этому ОК, т.е. контролировать различные параметры ОК. С другой стороны, вызывает необходимость отстраиваться от влияния мешающих факторов при контроле конкретного параметра [20].

Влияющие факторы можно разделить на два типа:

1) геометрические:

- зазор между ВТП и ОК;
- расстояние до края ОК;
- изменение геометрических размеров (толщины стенки, галтельных переходов, кривизны поверхности и т. п.);
- шероховатость поверхности ОК;

2) структурные:

- электрическая проводимость материала ОК;
- магнитная проницаемость материала ОК;
- химический состав материала ОК;
- зернистость;
- термическая обработка;
- наличие наплавленного при сварке металла;
- наличие наклепа.

При контроле параметров ОК, связанных с электропроводными свойствами, изменение магнитной проницаемости ОК является существенным мешающим фактором, не отстроившись от влияния которого невозможно выполнить контроль.

При выборе способа отстройки от мешающих факторов следует учитывать, что минимальное значение измеряемого параметра сигнала от воздействия дефекта должно превышать помехи не менее чем в два раза.

Первым способом отстройки (компенсации) является стабилизация условий контроля, другими словами, приведение величины мешающего фактора к постоянному значению по всему объему контролируемого объекта. Так,

если мешающим фактором является шероховатость поверхности, изделие можно обработать, устранив острые кромки, задиры и забоины, наплывы металла в зоне сварки или наплавки до требуемого уровня шероховатости.

Если мешающим фактором является зазор, связанный с различной толщиной слоя нетокопроводящего покрытия, такое покрытие необходимо удалить или, наоборот, восстановить в местах его отсутствия до требуемого значения.

Если на работу ВТП влияет изменение магнитной проницаемости объекта, то перед началом контроля изделие необходимо размагнитить. В некоторых случаях контролируемую деталь целесообразно, наоборот, намагнитить до насыщения, что позволяет получить одинаковое значение магнитной проницаемости по всему объему.

При выборе способа отстройки от мешающих факторов следует учитывать, что минимальное значение измеряемого параметра сигнала от воздействия дефекта должно превышать помехи не менее чем в два раза.

Если известно, на какой параметр (амплитуду, частоту, фазу и т.д.) выходного сигнала влияет мешающий фактор, то возможно применить второй способ отстройки, заключающийся в подавлении мешающего фактора или выделении полезной информации.

Амплитудный способ применяется, если изменение мешающего фактора влияет на фазу сигнала ВТП. В состав прибора, реализующего такой метод, входит амплитудный детектор, позволяющий отслеживать изменение амплиту-

ды сигнала, связанной с контролируемым параметром. Так, при достижении порогового уровня амплитуды, соответствующего критическому значению контролируемого параметра, произойдет срабатывание сигнализации дефекта (рисунок 2.4.2).

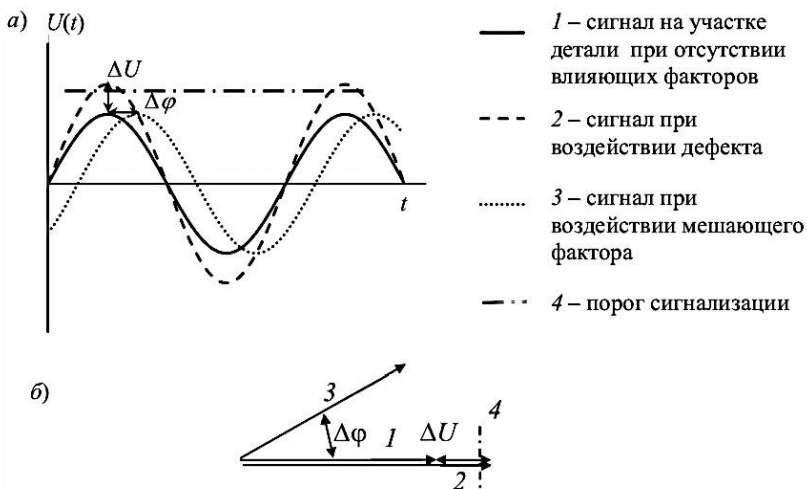


Рисунок 2.4.2 – Сущность амплитудного способа выделения информации [20]:

- а – изменения сигнала, вызванные дефектом и мешающим фактором, выраженным в синусоидальной форме;
- б – изменения сигнала, выраженные в векторной форме

При этом воздействие мешающего фактора и реакция сигнала в измерительной обмотке на него – изменение фазы сигнала. Это воздействие не будет влиять на показания прибора. Такой способ применим тогда, когда влияние полезного фактора (дефекта) и мешающего взаимно перпендикулярны (рисунок 2.4.2, б). Амплитудный

способ часто применяется для изделий с очень низкой шероховатостью.

Фазовый способ целесообразно применять в случае, если изменение мешающего фактора влияет на амплитуду сигнала. Для реализации данного способа в состав прибора включается фазовый детектор. При фазовом способе сигнал под воздействием дефекта изменяется, смещаясь по фазе.

Если влияние сигнала от дефекта и мешающих факторов не так однозначно (рисунок 2.4.3), то используют *амплитудно-фазовый способ* отстройки, при котором выстраивают направление фильтрации измеряемого сигнала перпендикулярно влиянию мешающего фактора.

Как видно из рисунка 2.4.3, мешающий фактор изменяется и по амплитуде и по фазе также, как сигнал от дефекта, но направление изменения разное, что и используется при установке порога таким образом, чтобы максимально отстроиться от мешающего фактора.

Для реализации *частотного способа* в простейшем случае в состав прибора включают колебательный контур (рисунок 2.4.4, а). Принцип работы такого детектора основан на увеличении индуктивного сопротивления преобразователя и уменьшении емкостного сопротивления конденсатора, включенных в колебательный контур, при увеличении частоты и наоборот (рисунок 2.4.4, б). При достижении резонансной частоты амплитуда сигнала ВТП резко увеличивается. Для простейшего последовательного коле-

бательного контура амплитуда тока и ширина частоты резонанса (рисунок 2.5.3, в) определяются его добротностью.

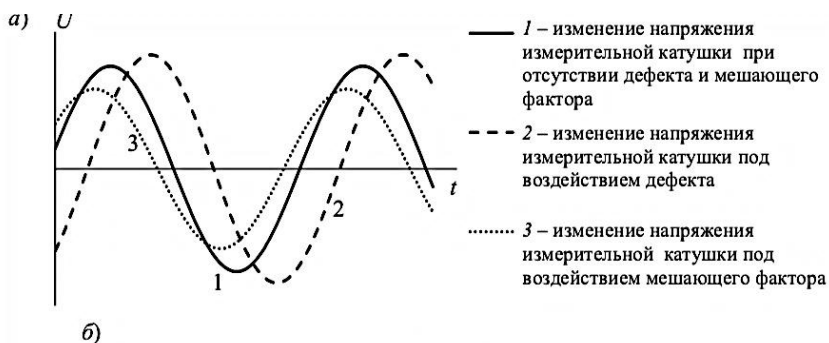


Рисунок 2.4.3 – Принцип выделения полезного сигнала амплитудно-фазовым методом [20]:

а – временная развертка; б – развертка в векторной форме:

- 1 – измерительной катушки при отсутствии дефекта и мешающего фактора; 2 – то же под воздействием дефекта;
- 3 – то же под воздействием мешающего фактора;
- 4 – направление, перпендикулярное вектору мешающего фактора; 5 – порог срабатывания дефектоскопа

Гораздо сложнее подавить мешающий фактор, если он одновременно влияет сразу на несколько параметров сиг-

нала ВТП или мешающих факторов несколько и их влияние разнонаправленно. Для пояснения этого и других способов неудобно использовать представление сигналов ВТП временными синусоидальными функциями, т.к. затруднительно оперировать ими (производить математические операции). Для удобства синусоидальные функции представляют векторами.

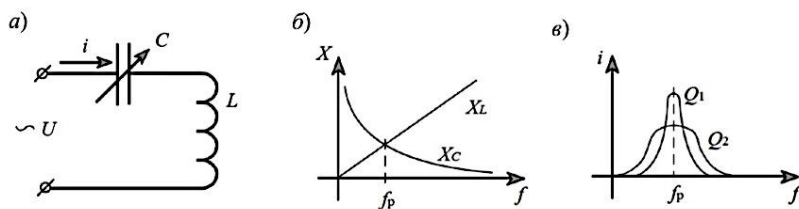


Рисунок 2.4.4 – Последовательный колебательный контур [20]:

a – электрическая схема; *б* – определение резонансной частоты; *в* – определение ширины пропускания

Для подавления нескольких мешающих факторов используют дополнительные способы отстройки от мешающих факторов, например, подмагничивание объекта, фиксирующие насадки и др.

2.4.5. Влияние параметров объектов контроля на сигналы вихретоковых дефектоскопов

Зная магнитную проницаемость μ и удельную электрическую проводимость σ контролируемого металла ОК, можно подобрать частоту возбуждающего тока и радиус преобразователя, которые обеспечат наилучшую чувстви-

тельность для контроля требуемого параметра и минимизируют влияние мешающих факторов.

Поскольку химический состав и структурное состояние материала ОК влияют не только на электромагнитные, но и на прочностные свойства, то опосредованно электропроводность σ и магнитная проницаемость μ оказываются связаны с пределом прочности, пределом текучести, твердостью и другими характеристиками прочности. Это обстоятельство используется для косвенной оценки прочностных характеристик по измеренным значениям электрической проводимости σ или магнитной проницаемости μ . Особенно хорошо такой способ работает в небольших диапазонах изменений, т.к. небольшие изменения структуры или наличия того или иного химического элемента приносят просто объясняемые изменения, носящие линейный характер. Поэтому измерения электрической проводимости σ или магнитной проницаемости μ при известных других параметрах или их произведения позволяют:

- определять изменения химического состава одной марки сплава;

- количественно оценивать объем какой-либо структурной составляющей (например, остаточного аустенита в закаленной стали, который является немагнитной фазой с $\mu \approx 1$);

- определять предел прочности или твердость сплава.

Однако и электрическая проводимость σ и магнитная проницаемость μ также имеют свои закономерности

изменения, которые необходимо знать при проведении контроля структурных и прочностных параметров.

Проводимость материала ОК зависит от температуры. В металле при нагреве увеличивается амплитуда и частота колебаний атомов в узлах кристаллической решетки, что приводит к увеличению сопротивления потоку движущихся электронов (электрическому току) и, следовательно, к снижению удельной проводимости.

Наилучшей проводимостью с относительно низкой ценой из химических элементов обладает медь, именно поэтому провода стараются делать из нее, чтобы уменьшить потери электроэнергии. Однако медь – металл достаточно дорогой, и там, где не так важна высокая проводимость, ее могут заменять на более дешевый алюминий.

В таблице 2.4.2 приведены металлы с наибольшей и наименьшей удельной электрической проводимостью σ , а также примеры проводимости наиболее распространенных металлов при нормальных температурных условиях (20–25 °С). Более подробно о сплавах с особыми электрическими свойствами можно узнать из справочной литературы по электротехническому материаловедению [21].

Особую роль играет магнитная проницаемость материала. Природа магнитной проницаемости связана со способностью вещества взаимодействовать с магнитным полем и более подробно описана в учебном пособии [22]. Магнитная проницаемость вещества является коэффициентом пропорциональности между напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией:

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H,$$

где B – магнитная индукция материала; μ – относительная магнитная проницаемость материала, в котором определяется магнитная индукция; μ_0 – магнитная постоянная (абсолютная магнитная проницаемость вакуума $1,256 \cdot 10^{-6}$ Гн/м); H – напряженность магнитного поля.

Таблица 2.4.2

Удельная электрическая проводимость некоторых металлов и сплавов

Металлы с самой высокой σ		Распространенные металлы и сплавы		Металлы с самой низкой σ	
Вещество	σ , МСм/м	Вещество	σ , МСм/м	Вещество	σ , МСм/м
Серебро	62,5	Литая сталь	7,8	Титан	2,1
Медь	58,2	Железо	10,0	Ртуть	1,0
Золото	45,5	Латунь	13,3	Висмут	0,83
Алюминий	37,0	Цинк	16,9	Серый чугун	0,85–2,4
Марганец	36,0	Бронза	5,3	Нихром	0,7–0,9

При распространении магнитного поля в веществе ОК оно не только пронизывает его, но и усиливается или ослабляется им. В зависимости от величины магнитной проницаемости μ все вещества делятся на три класса:

– диамагнетики – $\mu \approx 1$; $0,00001 < 1$ (при внесении в магнитное поле незначительно ослабляют его);

– парамагнетики – $\mu \approx 1 + 0,00001 \approx 1$ (незначительно усиливают магнитное поле);

– ферромагнетики – $\mu \gg 1$ (в сотни, тысячи раз усиливают магнитное поле).

Подавляющее большинство материалов являются диа- и парамагнетиками. Однако именно железо является ферромагнетиком, а т.к. сплавы железа – самые распро-

страненные материалы металлических конструкций и различных деталей, то влияние их высокой магнитной проницаемости на результаты контроля весьма существенны.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетика зависит от степени его намагниченности. График зависимости магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля носит сложный нелинейный характер (рисунок 2.4.5).

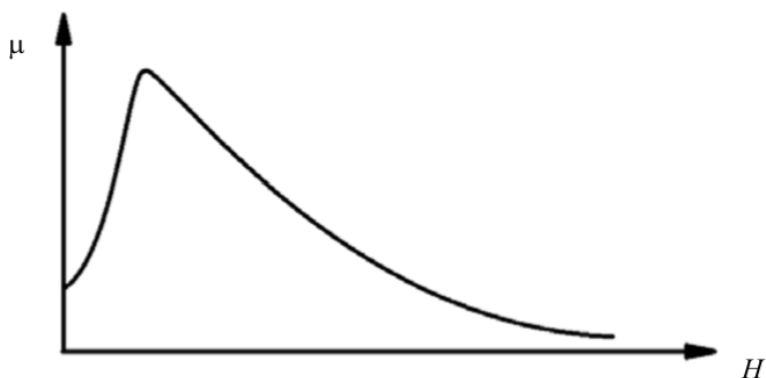


Рисунок 2.4.5 – Зависимость магнитной проницаемости μ ферромагнетика от напряженности H магнитного поля [20]

В вихретоковой дефектоскопии, чтобы отстроиться от колебаний магнитной проницаемости μ в контролируемом изделии, требуется либо размагнитить деталь, либо намагнитить ее так, чтобы проницаемость μ слабо изменялась, ведь возбуждающая катушка локально намагничивает участок детали и нестабильность магнитной проницаемости μ будет искажать сигналы в измерительном канале.

На структурное состояние металлов и сплавов влияет химический состав, размер зерна, режимы упрочнения, такие как термообработка, наклеп и др. В свою очередь, от структурного состояния зависят и прочностные, и электромагнитные свойства материалов. Даже небольшие изменения химического состава стали, связанные с содержанием углерода или легирующих элементов, приводят к значимым изменениям показаний вихретоковых приборов. На принципе связи удельной электрической проводимости металла с его пределом прочности, твердостью и другими механическими свойствами основана работа вихретоковых структуроскопов, которые позволяют выполнять сортировку деталей по маркам стали, анализировать качество упрочненного слоя, контролировать режимы термообработки и т. п. Вместе с тем при выполнении таких работ существенно усложняется задача отдельного контроля влияющих параметров объекта. Так, при контроле химического состава сплава мешающим фактором могут служить случайные вариации размера зерна, намагниченности материала, глубины упрочненного слоя и т. п. Решение задачи отдельного контроля структурных параметров объекта возможно с использованием анализа годографов вихретоковых преобразователей – траекторий движения конца вектора напряжения, в частности.

2.4.6. Основные функции и настройки вихретокового дефектоскопа

Настройка вихретокового дефектоскопа выполняется в соответствии с руководством по эксплуатации на стан-

дартном образце с использованием меры дефекта, регламентируемой руководящим документом.

На первом этапе настройки вихретокового дефектоскопа выбираются частота, амплитуда возбуждающего сигнала, коэффициент усиления дефектоскопа, режим контроля, в некоторых приборах эти функции неизменны, а в других необходимо их выбирать с учетом возможностей прибора и параметров контролируемого объекта (марки стали, шероховатости поверхности и т.д.).

На втором этапе настройки вихретокового дефектоскопа проводится установка нуля дефектоскопа (рисунок 2.4.6), т.е. точки равновесия автоколебательного контура, относительно которой вихретоковый дефектоскоп и оценивает изменения вихревых токов в ОК, на бездефектном участке стандартного образца.

Для этого у дефектоскопа есть клавиша автоматической установки нуля (ВД3-71) или регулятор ручной установки нуля (ВД-12НФ, ВД-12НФМ), некоторые приборы устанавливают баланс автоматически (ВД-213), для этого их надо установить на бездефектную часть образца и выдерживать паузу.

На третьем этапе настройки вихретокового дефектоскопа проводится установка порога срабатывания дефектоскопа при сканировании поверхности стандартного образца над искусственным дефектом (ИД). Перемещая преобразователь, кнопками или регуляторами управления порогом добиваются устойчивого срабатывания индикаторов (некоторые дефектоскопы имеют функцию автомати-

ческой установки порога при проведении над искусственным дефектом, например, ВД-213.1).

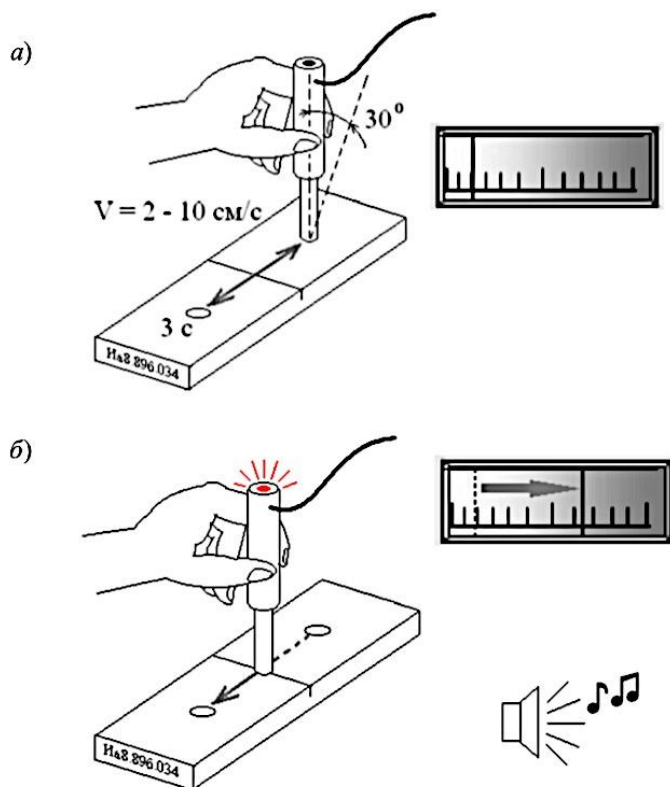


Рисунок 2.4.6 – Положение преобразователей при настройке на стандартном образце [20]:

а – на бездефектном участке; *б* – над дефектом

Основным результатом настройки вихретокового дефектоскопа является выбор чувствительности и установление порога срабатывания индикации дефектов в автоматическом режиме работы, соответствующие условиям контроля данного объекта.

Смысл процедуры настройки вихретокового дефектоскопа заключается в установке максимально возможного порогового уровня и минимального усиления дефектоскопа, обеспечивающего устойчивое срабатывание индикаторов дефекта при получении сигнала от меры дефекта с заданными геометрическими параметрами (глубиной дефекта). В этом случае при контроле изделия индикация сработает при обнаружении дефекта глубиной, равной глубине индикатора дефекта (ИД) на стандартном образце или большей. Регулировка усиления позволяет изменять амплитуду сигналов, получаемых на вихретоковом преобразователе (рисунок 2.4.7).

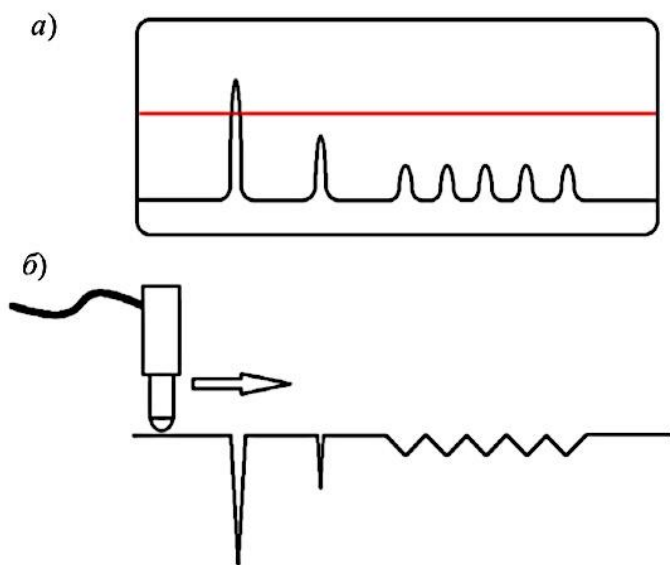


Рисунок 2.4.7 – Временная развертка сигнала ВТП [20]:

(а) при сканировании поверхности ОК
с различными дефектами (б)

Регулировка порога позволяет выбрать значение амплитуды сигнала (пороговый уровень), при превышении которого произойдет срабатывание индикации дефекта. При этом по уровню сигнала, полученному от дефекта, можно судить о глубине обнаруженного дефекта, зная уровень сигнала, полученного от искусственного дефекта заданной глубины при настройке на стандартном образце.

После настройки и установки преобразователя на контролируемую поверхность требуется дополнительно провести установку нуля для корректировки значения сигнала от бездефектного участка, т.к. электромагнитные свойства стали контролируемой детали, ее шероховатость и толщина могут несколько отличаться от стандартного образца, что приводит к смещению параметров выходного измеряемого сигнала. Для корректировочной балансировки измерительной схемы с установкой рабочего нуля следует установить рабочую точку, переместив стрелку на стрелочном индикаторе в центр левой части шкалы (на 2–3 деления левее оцифрованной отметки «0»), вращая регулятор «уст. 0» (рисунок 2.4.8).

Смысл настройки вихретокового дефектоскопа не зависит от типа настраиваемого прибора, это установка минимального значения измеряемого параметра, характерного для дефекта минимальных размеров. Однако процедуры для разных приборов могут значительно отличаться. Результатом контроля, выполненного с помощью любого дефектоскопа, как правило, является обнаружение дефектов.

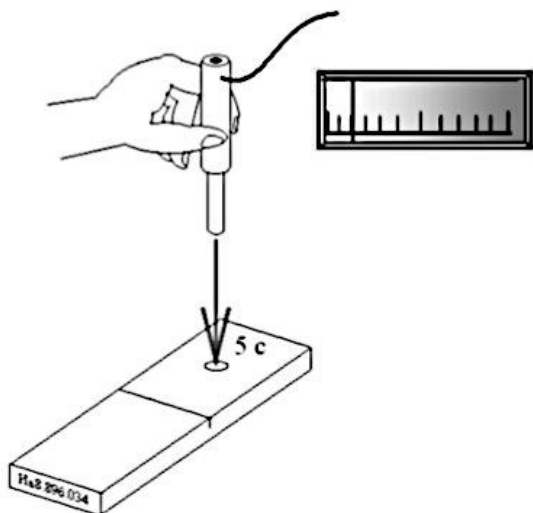


Рисунок 2.4.8 – Балансировка измерительной схемы с установкой рабочего нуля [20]

Использование жидкокристаллических экранов *цифровых индикаторов* позволяет представлять сигнал вихретокового преобразователя в виде временной развертки или развертки на комплексной плоскости (рисунок 2.4.9, а), которая позволяет проанализировать время прихода сигнала, время нарастания (крутизну) переднего фронта, время затухания сигнала. При этом отклонение сигнала может отображаться в виде фазы и амплитуды. На временной развертке удобно анализировать периодические сигналы.

Развертка на комплексной плоскости представляет сигнал в виде вектора или смещения конца вектора (рисунок 2.4.9, б) под воздействием дефекта или мешающего фактора. Основными информативными параметрами раз-

личных дефектов (рисунок 2.4.10) являются и амплитуда, и фаза сигнала.



Рисунок 2.4.9 – Представление информации о дефекте на временной развертке (а) и на комплексной плоскости (б) [20]:

1 – сигнал от мешающего фактора; 2 – область индикации дефекта; 3 – сигнал от дефекта

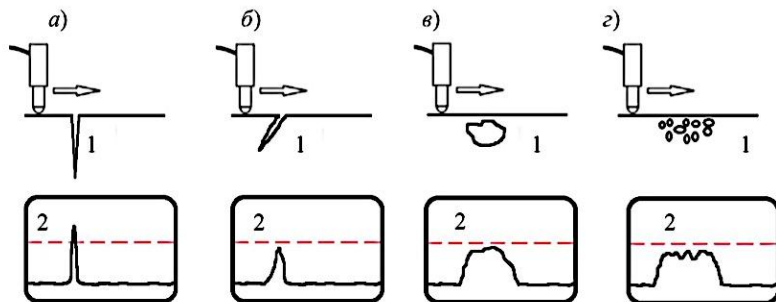


Рисунок 2.4.10 – Отображение различных дефектов (1) на временной развертке (2) дефектоскопа [20]:

а – поперечная трещина; б – наклонная трещина или расслоение; в – подповерхностная крупная раковина; г – скопление подповерхностных пор

При использовании жидкокристаллических мониторов дает возможность вывода всего разнообразия информативных параметров на экран дефектоскопа.

2.4.7. Итоги вихретокового контроля современных дефектоскопов

В современных дефектоскопах, позволяющих реализовать развертку сигнала на комплексной плоскости, отличительным признаком срабатывания над дефектом и ложного срабатывания является сдвиг фазового угла сигнала. При срабатывании индикаторов дефекта сначала необходимо убедиться, что оно не было вызвано отрывом, перекосом преобразователя или влиянием краевого эффекта.

В любом случае необходимо повторно просканировать место, где произошло срабатывание индикаторов, несколько раз, снизив скорость сканирования до минимально допустимой. В случае, если срабатывание индикаторов дефекта не повторяется, то с большой долей вероятности можно предположить, что оно было вызвано отрывом, перекосом преобразователя или влиянием краевого эффекта. В этом случае необходимо продолжить выполнение контроля ОК.

В случае, если при повторном сканировании срабатывание регулярно повторяется, необходимо внимательно осмотреть (по возможности с использованием переносной лампы, направляя ее лучи под разными углами) и ощупать подушечками пальцев подозрительное место. В случае обнаружения рисок, забоин, задигов, наплывов металла и т.п. необходимо изменить траектории сканирования так, чтобы не пересекать указанные неровности, но в то же время обеспечить достоверность контроля и выявление

возможных дефектов от неровностей, представляющих собой концентраторы напряжений.

Если при осмотре поверхности не обнаружено неровностей, но наблюдается устойчивое срабатывание индикаторов дефекта, необходимо отметить точку срабатывания мелом (чтобы не потерять ее в ходе дальнейших контрольных манипуляций) и провести параллельное сканирование слева – справа и снизу – сверху от точки первоначального срабатывания индикаторов, с уменьшенным от 3 до 5 мм шагом. Возможно также сканирование по расходящейся спирали. Если при этом срабатывания будут продолжаться, то необходимо отмечать места новых срабатываний мелом (рисунок 2.4.11), в случае выстраивания этих отметок в линию – осмотреть этот участок с использованием переносной лампы и лупы (при необходимости зачистить до металла) и убедиться в наличии трещины.

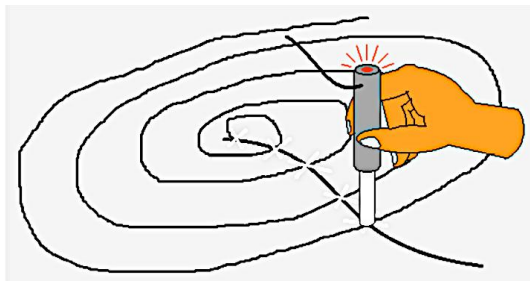


Рисунок 2.4.11 – Определение длины дефекта

При распознавании дефекта целесообразно также перевести дефектоскоп в ручной режим и просканировать место обнаружения трещины для определения ее длины и ориентации. При этом скорость сканирования может быть

снижена до нуля, а дефектоскопист ориентируется по показаниям стрелочных или жидкокристаллических индикаторов прибора. При расположении ПЭП непосредственно над трещиной наблюдается максимум сигнала преобразователя. В случае, если выбран статический режим работы дефектоскопа, индикаторы дефекта при неподвижном расположении над трещиной или при движении вдоль нее будут светиться и издавать непрерывный звук.

В некоторых случаях устойчивое срабатывание индикаторов дефекта вызывает наличие зоны локальной неоднородности электромагнитных свойств материала ОК. Распознать такую зону можно, ориентируясь на ее геометрические размеры. В отличие от трещины, имеющей ярко выраженное преобладание одного размера (длины над шириной раскрытия), зона локальной неоднородности (например, магнитное пятно) характеризуется значительной протяженностью по обоим направлениям. Следует помнить, что неоднородность электромагнитных свойств материала ОК наблюдается в местах термической, механической, химической обработки металла и т. п.

При распознавании зоны локальной неоднородности необходимо ориентироваться на показания стрелочных или жидкокристаллических индикаторов дефектоскопа в ручном режиме. При пересечении трещины будет наблюдаться резкое возрастание и убывание сигнала (резкое отклонение стрелки от рабочего нуля и возвращение ее к исходному положению). При пересечении зоны локальной неоднородности наблюдается плавное отклонение стрел-

ки от нуля при приближении к границе зоны (не обязательно в сторону, соответствующую обнаружению дефекта), устойчивое новое положение стрелки при движении по зоне (возможны некоторые колебания стрелки у нового положения равновесия) и плавное возвращение к рабочему нулю при завершении прохождения зоны.

После распознавания обнаруженного дефекта необходимо оценить его размеры и принять решение о браковке контролируемой детали. Длина дефекта измеряется с помощью линейки. О глубине дефекта можно судить по показаниям стрелочного или жидкокристаллического индикаторов. Так, если отклонение стрелки на стрелочном индикаторе равно отклонению при пересечении искусственного дефекта на стандартном образце или превышает его, то глубина обнаруженной трещины в месте измерения равна глубине ИД или более (например, 3 мм по стандартному или настроечному образцу).

На некоторых типах дефектоскопов показания жидкокристаллического индикатора глубины дефекта (условные единицы), отображающиеся на экране, когда амплитуда сигнала превышает пороговый уровень, можно использовать для построения градуировочной зависимости. При этом фиксируют значения индикатора глубины дефекта при многократном пересечении ИД глубиной 0,5 мм (на примере СОП 8.896.034) и вычисляют среднеарифметическое значение, затем повторяют процедуру для ИД глубиной 3 мм. При этом настройка усиления и порога должны обеспечивать срабатывание индикаторов дефекта. По по-

лученным данным строят градуировочную зависимость величины глубины дефекта от индикации дефектоскопа (рисунок 2.4.12), которую используют для определения глубины обнаруживаемых трещин. Для качественно построенной зависимости погрешность не превышает 0,25 мм.

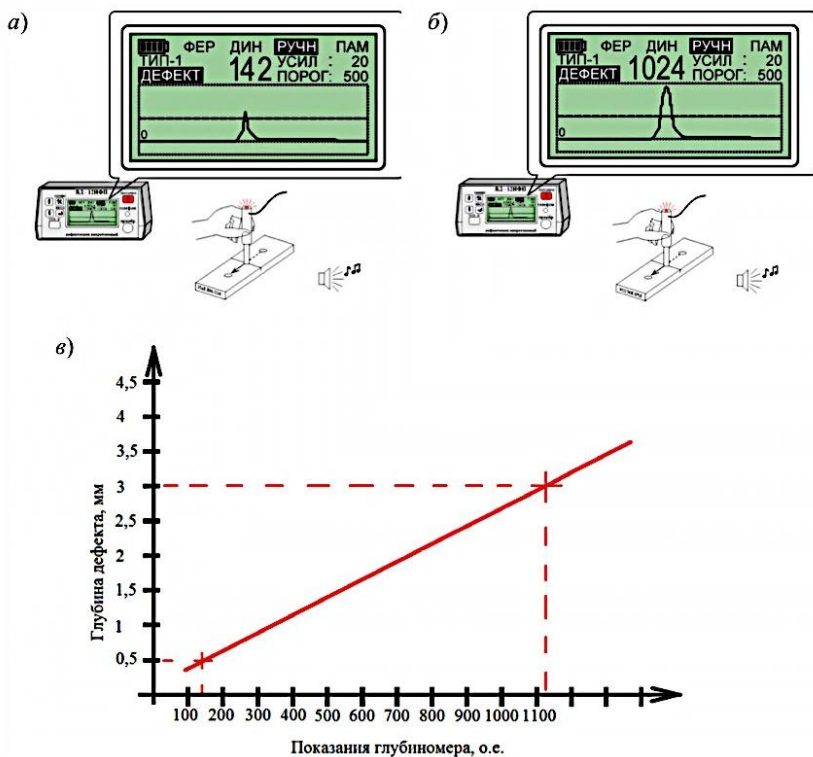


Рисунок 2.4.12 – Построение градуировочной зависимости [20]:

а, б – показания глубиномера над ИД глубиной 0,5 и 3 мм соответственно; в – вид градуировочной зависимости

Следует отметить, что плотность вихревых токов, в зависимости от глубины проникновения, изменяется нелинейно, а значит, аппроксимировать градуировочную зависимость линейной функцией не вполне корректно. Это приводит к тому, что при измерении дефектов глубиной 5–6 мм и более погрешность измерений значительно возрастает.

В некоторых типах дефектоскопов предусмотрена градуировка показаний индикатора глубины дефекта в миллиметрах. В этом случае в построении градуировочной зависимости нет необходимости.

Заключение о браке или годности детали по результатам её вихретокового контроля выдает специалист второго уровня квалификации по вихретоковому методу контроля ОК – деталей и пр. изделий с подробным фиксированием результатов обнаружения дефекта/дефектов – результатов измерения длины и глубины дефекта/дефектов, по которым выносится заключение о браке.

В последние годы вихретоковый метода НК находит все более широкое применение в различных областях промышленности благодаря таким своим особенностям, как многопараметровость, высокая чувствительность, бесконтактность, минимальные требования к качеству подготовки контролируемой поверхности. Данный метод используется для решения различных задач (дефектоскопии, структуроскопии, измерения геометрических размеров и пр.).

Контрольные вопросы

1. Какие ВТП целесообразно использовать для контроля деталей сложной формы?
2. Какие дефекты хорошо выявляют проходные ВТП?
3. Какие задачи можно решить с помощью вихретокового метода?
4. Для чего внутри обмотки накладного преобразователя устанавливается сердечник?
5. Из какого материала выполняется сердечник и почему?
6. Как индуктивность влияет на э.д.с. катушки ВТП?
7. Как количество витков ВТП влияет на выходную э.д.с. ВТП?
8. Какими бывают вихретоковые дефектоскопы по виду представляемой информации о дефекте?
9. Какую информацию получает специалист на временной развертке?
10. Что отображается на экране с комплексной плоскостью?
11. Каким образом в ВТП на временной развертке отображается сигнал о наличии дефекта?
12. Чем на временной развертке различаются сигнал от трещины и сигнал от подповерхностного объемного дефекта?
13. Из каких основных элементов состоит вихретоковый дефектоскоп?
14. Каков смысл настройки вихретокового дефектоскопа?
15. Чем различаются статический и динамический режимы работы дефектоскопа?

16. Что называется контролируемым и мешающим параметрами вихретоковых дефектоскопов?
17. Какие параметры объектов контроля можно определять при вихретоковой дефектоскопии?
18. Какие характеристики объектов контроля можно определять в задачах вихретоковой структуроскопии?
19. Какие факторы влияют на сигналы ВТП?
20. Какие основные способы отстройки от мешающих факторов используются при ВТК?
21. Какой физический смысл имеют действительная и мнимая части комплексного числа? Приведите примеры.
22. Для чего применяется анализ годографов вихретокового преобразователя?
23. Как классифицируются вещества объектов контроля по магнитным свойствам?
24. Покажите, как складываются векторные величины, например, напряжение.
25. Изобразите синусоиды двух векторов относительно синусоиды обмотки возбуждения, начинающейся из нуля.
26. Что такое «годограф»?
27. Как меняется сигнал на ВТП при изменении обобщенного параметра?
28. От каких характеристик материала и ВТП зависит обобщенный параметр вихретокового контроля?
29. Какими бывают вихретоковые дефектоскопы по виду представляемой информации о дефекте?
30. Какую информацию получает специалист на временной развертке?

31. Каким образом в ВТП на временной развертке отображается сигнал о наличии дефекта?
32. Чем на временной развертке отличается сигнал от трещины от сигнала подповерхностного объемного дефекта?
33. Из каких основных элементов состоит ВТП?
34. Каков смысл настройки вихретокового дефектоскопа?
35. Какие параметры дефектоскопа настраиваются на стандартном образце?
36. Какие параметры дефектоскопа настраиваются на объекте контроля?
37. В чем заключаются особенности настройки дефектоскопов со стрелочными индикаторами?
38. В чем заключаются особенности настройки дефектоскопов с временной разверткой?
39. В чем заключаются особенности настройки дефектоскопов с разверткой на комплексной плоскости?
40. Настройка глубиномера.
41. Какие типы траекторий сканирования контролируемой поверхности применяются при вихретоковом контроле?
42. Каковы основные параметры сканирования при вихретоковом контроле?
43. В чем заключаются особенности применения дефектоскопов с роторными преобразователями?
44. Как определяются длина и глубина обнаруженных трещин?
45. Каковы требования к оформлению результатов вихретокового контроля?

2.5. Метод НК проникающими веществами

2.5.1. Общие сведения о капиллярном методе НК

Метод НК проникающими веществами (капиллярный метод – КМК) основан на [23]:

- капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полость несплошностей материала ОК;
- регистрации образующихся индикаторных следов визуально или с помощью преобразователя.

Капиллярный метод позволяет обнаруживать поверхностные (т.е. выходящие на поверхность) и сквозные (т.е. соединяющие противоположные поверхности стенки ОК) дефекты, которые могут быть обнаружены также при визуальном контроле.

Преимущество КМК в многократном ускорении процесса контроля. Обнаружение сквозных дефектов входит в задачу методов течеискания. В методах течеискания наряду с другими способами используют КМК, причем индикаторную жидкость наносят с одной стороны стенки ОК, а регистрируют с другой.

Основными документами, регламентирующим применение КМК, являются ГОСТ 18442-80, 28369-89 и 24522-80, регламентирующими вариант КМК, при котором индикацию выполняют с той же поверхности ОК, с которой наносят индикаторную жидкость.

Процесс капиллярного метода НК состоит из следующих основных операций (рисунок 2.5.1):

- очистка поверхности 1 ОК и полости дефекта 2 от загрязнений, жира и т.д. путем их механического удаления и рас-

творения. Этим обеспечивается хорошая смачиваемость всей поверхности ОК индикаторной жидкостью и возможность проникновения ее в полость дефекта;

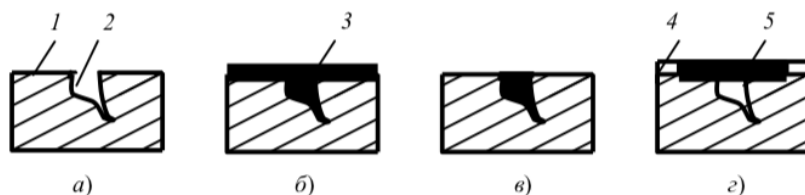


Рисунок 2.5.1 – Основные операции при капиллярной дефектоскопии [23]:

а – очистка поверхности контролируемого объекта; *б* – пропитка дефектов пенетрантом; *в* – удаление излишков пенетранта; *г* – обнаружение пенетранта в дефектах; 1 – поверхность ОК; 2 – полость дефекта; 3 – пенетрант; 4 – проявитель; 5 – след

– пропитка дефектов индикаторной жидкостью. 3. Для этого она должна хорошо смачивать материал изделия и проникать в дефекты в результате действия капиллярных сил. По этому признаку метод называют капиллярным, а индикаторную жидкость – индикаторным пенетрантом или просто пенетрантом (от лат. *penetro* – проникаю, достаю); – удаление с поверхности ОК излишков пенетранта, при этом пенетрант в полости дефектов сохраняется. Для удаления используют эффекты диспергирования и эмульгирования, применяют специальные жидкости – очистители; – обнаружение пенетранта в полости дефектов. Как отмечено выше, это делают чаще визуально, реже – с помощью специальных устройств – преобразователей. В случае визуального обнаружения пенетранта на поверхности ОК наносят специальные вещества – проявители 4, извлекаю-

щие пенетрант из полости дефектов за счет явлений сорбции или диффузии. Сорбционный проявитель имеет вид порошка или суспензии.

Пенетрант пропитывает весь слой проявителя (довольно тонкий обычно) и образует следы (индикации) 5 на его наружной поверхности. Эти индикации обнаруживают визуально. Различают:

- яркостный или ахроматический метод, в котором индикации имеют более темный тон по сравнению с белым проявителем;
- цветной метод, когда пенетрант обладает ярким оранжевым или красным цветом;
- люминесцентный метод, когда пенетрант светится под действием ультрафиолетового облучения.

Заключительная операция при КМК – очистка ОК от проявителя.

В литературе по капиллярному контролю дефектоскопические материалы обозначают индексами: индикаторный пенетрант – «И», очиститель – «М», проявитель – «П». Иногда после буквенного обозначения следуют цифры в скобках или в виде индекса, означающие особенность применения данного материала.

2.5.2. Основные физические явления, используемые в капиллярной дефектоскопии

Поверхностное натяжение и смачивание. Наиболее важной характеристикой индикаторных жидкостей является их способность к смачиванию материала изделия.

Смачивание вызывается взаимным притяжением атомов и молекул (далее – молекул) жидкости и твердого тела.

Известно, что между молекулами среды действуют силы взаимного притяжения. Молекулы, находящиеся внутри вещества, испытывают со стороны других молекул в среднем одинаковое действие по всем направлениям. Молекулы же, находящиеся на поверхности, подвергаются неодинаковому притяжению со стороны внутренних слоев вещества и со стороны, граничащей с поверхностью среды. Поведение системы молекул определяется условием минимума свободной энергии, т.е. той части потенциальной энергии, которая изотермически может обратиться в работу. Свободная энергия молекул на поверхности жидкости и твердого тела больше, чем внутренних, когда жидкость или твердое тело находятся в газе или вакууме. В связи с этим они стремятся приобрести форму с минимальной наружной поверхностью. В твердом теле этому препятствует явление упругости формы, а жидкость в невесомости под влиянием этого явления приобретает форму шара. Таким образом, поверхности жидкости и твердого тела стремятся сократиться, и возникает давление поверхностного натяжения.

Величину поверхностного натяжения определяют работой (при постоянной температуре), необходимой для образования единицы, площади поверхности раздела двух находящихся в равновесии фаз. Ее часто называют силой поверхностного натяжения, понижая под этим следующее. На границе раздела, сред выделяют произвольную пло-

щадку. Натяжение рассматривают как результат действия распределенной силы, приложенной к периметру, этой площадки. Направление сил – по касательной к границе раздела и перпендикулярно периметру. Силу, отнесенную к единице длины периметра, называют силой поверхностного натяжения. Два равноправных определения поверхностного натяжения соответствуют двум применяемым для его измерения единицам: Дж/м² = Н/м. Для воды в воздухе (точнее, в воздухе, насыщенном испарениями с поверхности воды) при температуре 26 °С нормальном атмосферном давлении сила поверхностного натяжения $\sigma = 7,275 \pm 0,025) 10^{-2}$ Н/м. Это значение уменьшается с увеличением температуры. В различных газовых средах поверхностное натяжение жидкостей практически не изменяется.

Выделим в капле жидкости, лежащей на поверхности: твердого тела (рисунок 2.5.2), элементарный цилиндр в точке А, где соприкасаются твердое тело, жидкость и окружающий газ. Силой тяжести пренебрегаем.

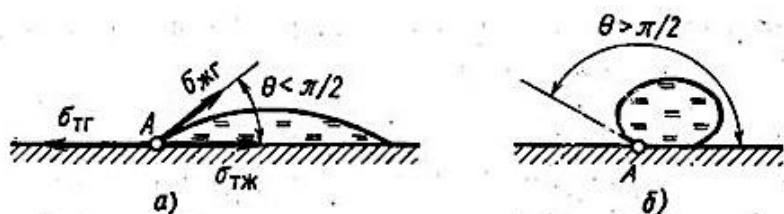


Рисунок 2.5.2 – Смачивание (а) и несмачивание (б) поверхности жидкостью [23]

На единицу длины выделенного цилиндра действуют три силы поверхностного натяжения:

– $\sigma_{тг}$ – «твердое тело – газ»;

– отж – «твердое тело – жидкость»;

– $\sigma_{жг} = \sigma$ – «жидкость – газ».

Когда капля жидкости находится в состоянии покоя, равнодействующая проекций этих сил на поверхность твердого тела равна нулю.

Угол θ (рисунок 2.5.2, б) называют краевым углом смачивания. Чем меньше угол θ , тем сильнее смачивание. Предельный случай $\theta = 0$ соответствует полному смачиванию, т.е. растеканию жидкости по поверхности твердого тела до толщины молекулярного слоя. Если угол θ тупой (см. рисунок 2.5.2, б) жидкость не смачивает твердое тело.

Поверхностное натяжение σ характеризует свойство самой жидкости, а $\cos \theta$ – смачиваемость этой жидкостью поверхности данного твердого тела. Для большинства хорошо смачивающих веществ $\cos \theta$ близок к единице, например, для границы стекла с водой он равен 0,685, с керосином — 0,900, а с этиловым спиртом — 0,955. Сильное влияние на смачивание оказывает чистота поверхности. Например, слой масла на поверхности стали или стекла резко ухудшает ее смачиваемость водой, $\cos \theta$ становится отрицательным. Тончайший слой масла, иногда сохраняющийся на поверхности ОК и трещин очень мешает применению пенетрантов на водяной основе.

Процесс растворения состоит в распределении молекул растворяемого вещества среди молекул растворителя. В капиллярном методе контроля растворение применяют при подготовке объекта к контролю (для очистки полости дефектов). Растворение газа (обычно воздуха), со-

бравшегося у конца тупикового капилляра (дефекта) в пенетранте, существенно повышает предельную глубину проникновения пенетранта в дефект.

Для оценки взаимной растворимости двух жидкостей применяют эмпирическое правило, согласно которому «подобное растворяется в подобном». Например, углеводороды хорошо растворяются в углеводородах, спирты – в спиртах и т.д. Взаимная растворимость жидкостей и твердых тел в жидкости, как правило, увеличивается при повышении температуры. Растворимость газов, как правило, уменьшается с повышением температуры и улучшается при повышении давления.

Сорбция (от лат. sorbeo – поглощаю) – это физико-химический процесс, в результате которого происходит поглощение каким-либо веществом газа, пара или растворенного вещества из окружающей среды. Различают адсорбцию – поглощение вещества на поверхности раздела фаз и абсорбцию – поглощение вещества всем объемом поглотителя. Если сорбция происходит преимущественно в результате физического взаимодействия веществ, то ее называют физической.

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

Диффузия (от лат. diffusio – распространение, растекание) – движение частиц (молекул, атомов) среды, приводящее к переносу вещества и выравнивающее концентрацию частиц разного сорта. В капиллярном методе контроля явление диффузии наблюдается при взаимодействии пенетранта с воздухом, сжатым в тупиковом конце капилляра. Здесь этот процесс неотличим от растворения воздуха в пенетранте.

Важное применение диффузии при капиллярной дефектоскопии – проявление с помощью проявителей типа быстросохнущих красок и лаков. Частицы пенетранта, заключенного в капилляре, входят в контакт с таким проявителем (в первый момент – жидким, а после застывания – твердым), нанесенным на поверхность ОК, и диффундируют через тонкую пленку проявителя к противоположной его поверхности. Таким образом, здесь используется диффузия молекул жидкости сначала через жидкое, а потом через твердое тело.

Процесс диффузии обусловлен тепловым движением молекул (атомов) или их ассоциаций (молекулярная диффузия). Скорость переноса через границу определяется коэффициентом диффузии, который является постоянным для данной пары веществ. Диффузия возрастает с повышением температуры.

Диспергирование (от лат. dispergo – рассеиваю) – тонкое размельчение какого-либо тела в окружающей среде. Диспергирование твердых тел в жидкости играет

существенную роль при очистке поверхности от загрязнений.

Эмульгирование (от лат. *emulsio* – выдоенный) – образование дисперсной системы с жидкой дисперсной фазой, т.е. диспергирование жидкости. Пример эмульсии – молоко, состоящее из мельчайших капель жира, взвешенных в воде. Эмульгирование играет существенную роль при очистке, удалении, излишков пенетранта, приготовления пенетрантов, проявителей. Для активизации эмульгирования и сохранения эмульсии в стабильном состоянии применяют вещества-эмульгаторы.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) – вещества, способные накапливаться на поверхности соприкосновения двух тел (сред, фаз), понижая ее свободную энергию. ПАВ добавляют в средства для очистки поверхности ОК, вводят в пенетранты, очистители, поскольку, они являются эмульгаторами. Важнейшие ПАВ растворяются в воде. Их молекулы имеют гидрофобную и гидрофильную части, т.е. смачиваемую и несмачиваемую водой. Проиллюстрируем действие ПАВ при смывании масляной пленки. Обычно вода ее не смачивает и не удаляет. Молекулы ПАВ адсорбируются на поверхности пленки, ориентируются к ней своими гидрофобными концами, а гидрофильными – к водной среде. В результате происходит резкое усиление смачиваемости, и жировая пленка смывается.

Суспензия (от лат. *supspensio* – подвешиваю) – грубодисперсная система с жидкой дисперсной средой и твердой дисперсной фазой, частицы которой достаточно

крупны и довольно быстро выпадают в осадок или всплывают. Суспензии приготавливают обычно механическим размельчением и размешиванием.

Люминесценция (от лат. *lumen* – свет) – свечение некоторых веществ (люминофоров), избыточное над тепловым излучением, обладающее длительностью 10^{-10} с и больше. Указание на конечную длительность нужно, чтобы отличать люминесценцию от других оптических явлений, например, от рассеяния света.

В капиллярном методе контроля люминесценцию используют как один из способов контраста для визуального обнаружения индикаторных пенетрантов после проявления. Для этого люминофор, либо растворяют в основном веществе пенетранта, либо само вещество пенетранта является люминофором.

Яркостный и цветовой контрасты в КМК рассматривают с точки зрения возможности глаза человека фиксировать люминесцентное свечение, цветные и темные индикации на светлом фоне. Все данные относят к глазу среднего человека. Возможность различать степень яркости объекта называют контрастной чувствительностью. Ее определяют по различимому глазом изменению коэффициента отражения. В цветном методе контроля вводят понятие яркостно-цветового контраста, одновременно учитывающее яркость и насыщенность следа от дефекта, который нужно обнаружить.

Способность глаза различать мелкие объекты, обладающие достаточным контрастом, определяют мини-

мальным углом зрения. Установлено, что объект в виде полосы (темной, цветной или люминесцирующей) глаз способен заметить с расстояния 200 мм при ее минимальной ширине более 5 мкм. В рабочих условиях различают объекты на порядок больше – шириной 0,05–0,1 мм.

Процессы капиллярной дефектоскопии

Заполнение сквозного макрокапилляра. Из курса физики известен опыт заполнения капиллярной трубки: капиллярная трубка диаметром $2r$ вертикально погружена одним концом в смачивающую жидкость (рисунок 2.5.3).

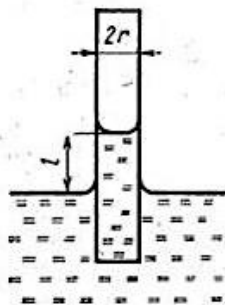


Рисунок 2.5.3 – Схема заполнения капиллярной трубки смачивающей жидкостью [23]

Под действием сил смачивания жидкость в трубке поднимется на высоту l над поверхностью. Это явление капиллярного впитывания. Силы смачивания действуют на единицу длины окружности мениска. Суммарная их величина $F_k = \sigma \cos \theta 2\pi r$. Этой силе противодействует вес столба $\rho g \pi r^2 l$, где ρ – плотность, а g – ускорение силы тяжести. В состоянии равновесия $\sigma \cos \theta 2\pi r = \rho g \pi r^2 l$. Отсюда высота подъема жидкости в капилляре $l = 2\sigma \cos \theta / (\rho g r)$.

Капиллярное давление увеличивается с увеличением смачиваемости и уменьшением радиуса капилляра.

Пропитка дефектов пенетрантом основана на явлении капиллярного впитывания.

2.5.3. Технология и средства капиллярного контроля

Схема общей технологии капиллярного контроля показана на рисунке 2.5.4.

Цель подготовительных операций – вывести на поверхность изделия устья дефектов, устранить возможность возникновения фона и ложных индикаций, очистить полость дефектов. Способ подготовки зависит от состояния поверхности и требуемого класса чувствительности.

Механическую зачистку производят, когда поверхность ОК покрыта окалиной или силикатом. Например, поверхность некоторых сварных швов покрыта слоем твердого силикатного флюса типа «березовая кора». Такие покрытия закрывают устья дефектов. Гальванические покрытия, пленки, лаки не удаляют, если они трескаются вместе с металлом ОК. Если такие покрытия наносят на ОК, в которых уже могут быть дефекты, то контроль выполняют до нанесения покрытия. Зачистку выполняют резанием, абразивной шлифовкой, обработкой металлическими щетками. Этими способами удаляется часть материала с поверхности ОК. Ими нельзя зачищать глухие отверстия, резьбы. При шлифовании мягких материалов дефекты могут перекрываться тонким слоем деформированного материала.

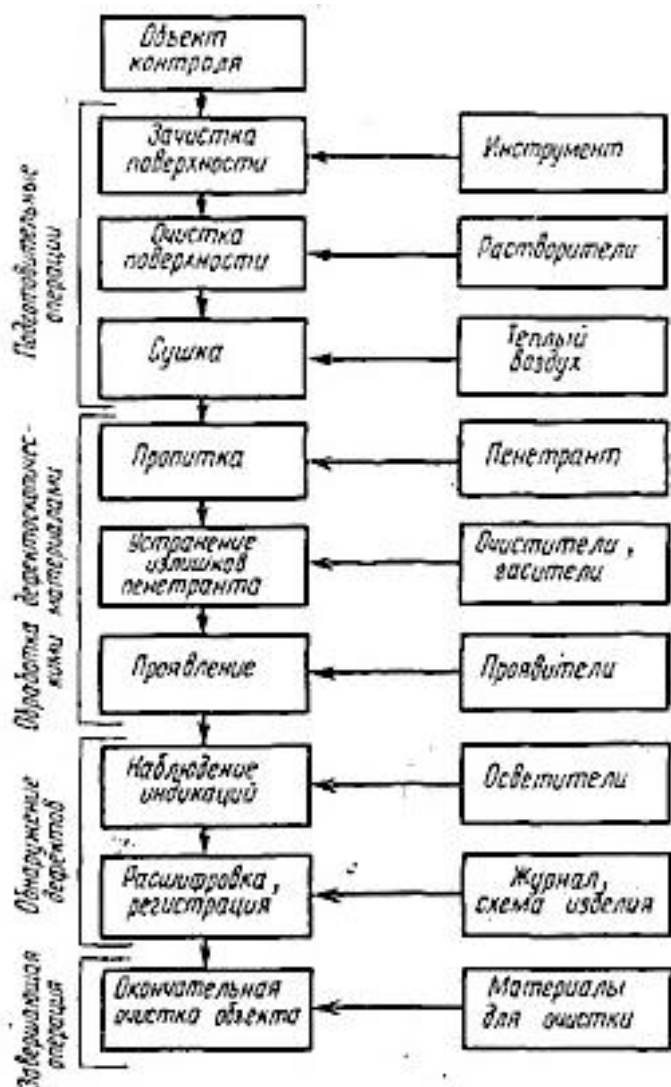


Рисунок 2.5.4 – Технологическая схема капиллярного контроля [23]

Механической очисткой называют и обдувание дробью, песком, косточковой крошкой. После механиче-

ской очистки предусматривают удаление ее продуктов с поверхности. Очистке моющими средствами и растворами подвергают все поступающие на контроль ОК, в т.ч. прошедшие механическую зачистку и очистку.

Механическая зачистка не очищает полости дефектов, а иногда ее продукты (шлифовальная паста, абразивная пыль) могут способствовать их закрытию. Очистку выполняют водой с добавками ПАВ и растворителями, в качестве которых используют спирты, ацетон, бензин, бензол и др. С их помощью удаляют консервирующую смазку, некоторые лакокрасочные покрытия. При необходимости обработку растворителями выполняют несколько раз.

Для более полной очистки поверхности ОК и полости дефектов применяют способы интенсификации очистки: воздействие парами органических растворителей, химическое травление (помогает удалению с поверхности продуктов коррозии), электролиз, прогрев ОК, воздействие низкочастотными ультразвуковыми колебаниями.

После очистки проводят сушку поверхности ОК. Этим удаляют остатки моющих жидкостей и растворителей из полостей дефектов. Сушку интенсифицируют повышением температуры, обдувом, например, используют струю теплого воздуха из фена.

Пропитка пенетрантом. К пенетрантам предъявляют целый ряд требований. Хорошая смачиваемость поверхности ОК — главное из них. Для этого пенетрант должен иметь достаточно высокое поверхностное натяжение и краевой угол, близкий к нулю при растекании по поверх-

ности ОК. Чаще всего в качестве основы пенетрантов используют такие вещества, как керосин, жидкие масла, спирты, бензол, скипидар, у которых поверхностное натяжение $(2,5-3,5)10^{-2}$ Н/м. Реже используют пенетранты на водной основе с добавками ПАВ. Для всех этих веществ $\cos \theta$ не менее 0,9. Второе требование к пенетрантам – низкая вязкость. Она нужна для сокращения времени пропитки. Третье важное требование – возможность и удобство обнаружения индикаций. По контрасту пенетранта КМК разделяют на ахроматический (яркостный), цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной. Кроме того, существуют комбинированные КМК, в которых индикации обнаруживают не визуально, а с помощью различных физических эффектов. По типам пенетрантов, точнее по способам их индикации, осуществляют классификацию КМК. Примером ахроматического КМК является так называемая «керосиновая проба», до настоящего времени довольно широко применяемая в некоторых производствах. В ней в качестве пенетранта используют керосин, а в качестве проявителя – мел, на котором выступивший керосин оставляет темные следы.

Для придания цветового контраста в названные выше смачивающие вещества добавляют оранжевые или красные красители типа «50», «Ж», «Судан». Люминесцирующими свойствами обладают некоторые из смачивающих веществ: нориол, трансформаторное масло. Люминесценция вызывается или усиливается введением специальных добавок (флюороля, дефектоля, триэтаноламина).

Люминесценции индикаций несколько лучше обнаруживаются глазом, чем цветовой контраст, но требует УФ-облучателей и выполняется в условиях затемнения. Существуют люминесцентно-цветные пенетранты, которые обнаруживаются обоими способами. Пример такого пенетранта – родамин С, растворимый в этиловом спирте.

В рецептуре некоторых пенетрантов предусмотрено введение небольшого количества эмульгаторов ОП-7, ОП-10. Они способствуют повышению смачивающих свойств, образованию эмульсий плохо растворимых добавок в смачивающей жидкости. Дополнительными требованиями к пенетрантам являются минимальная вредность для окружающего персонала, хотя полностью избежать вредного действия иногда не удастся; минимальное корродирующее действие на изделие (антикоррозионный пенетрант не должен содержать более 1 % серы и хлора); небольшая стоимость.

Некоторые комбинированные методы, где пенетрант в индикациях обнаруживают с помощью преобразователей. В капиллярно-радиоактивном методе используют пенетрант в виде спирта с добавками радиоактивного хлористого цезия-137. Это позволяет обнаруживать дефекты по гамма-излучению. Метод очень чувствителен, но опасен для персонала. В капиллярно-вихретоковом методе применяют пенетранты, обнаруживаемые по их электропроводности с помощью вихретокового датчика. Такие пенетранты (например, раствор олеиновой кислоты и оксида

магния в керосине) применяют при контроле неэлектропроводящих материалов.

Специфическим видом пенетранта является фильтрующаяся суспензия. В жидкий пенетрант добавляют нерастворимый порошок с диаметром частиц 0,01–0,1 мм, обладающий цветовым контрастом или люминесценцией. Порошок не проникает в дефект, а фильтруется и скапливается у его устья. Такой пенетрант не требует проявления. В настоящее время промышленность выпускает готовые пенетранты для контроля. Поэтому необходимость в точном знании рецептуры отпадает. Люминесцентные пенетранты марок ЛЖ с различными индексами пригодны для контроля металлов, пластмасс, стекла, керамики при температуре 15–35 °С. Цветной пенетрант марки К применяют для контроля металлов, стекла, керамики при температурах от – 40 до +40 °С. Специальные виды пенетрантов для контроля при повышенной температуре, методом фильтрующейся суспензии, люминесцентно-цветным, комбинированными методами промышленность не выпускает. Пропитку пенетрантом выполняют погружением в ванну, намазыванием кистью, поливанием, разбрызгиванием пульверизатором или из аэрозольного баллона. Пенетрант оставляют на поверхности ОК от 10 до 30 мин, а в среднем – 20 мин.

Существует ряд способов интенсификации процесса пропитки: вакуумирование ОК перед пропиткой; воздействие на ОК повышенным давлением после нанесения на него пенетранта; воздействие на ОК во время контакта его

с пенетрантом упругих механических колебаний или статического нагружения, увеличивающего раскрытие дефектов, электрическое взаимодействие частиц пенетранта, которым сообщается электрический заряд, с ОК, которому сообщается заряд другого знака; воздействие на пенетрант, находящийся вблизи поверхности ОК, ультразвуковыми колебаниями.

Основные требования к УЗ-колебаниям, используемым для интенсификации пропитки, – возникновение кавитации, т.е. образования и захлопывания небольших пузырьков. Применяют колебания частотой 15–25 кГц, интенсивностью, на порядок превышающей; пороговое значение для возникновения кавитации 0,1–0,2 кВт. Эффект УЗ-пропитки не зависит от направления колебаний вибратора относительно поверхности ОК, однако УЗ-колебания экранируются объектом.

Удаление излишков пенетранта с поверхности ОК необходимо, чтобы исключить образование фона (при неполном удалении пенетранта), возникновение ложных индикаций (при сохранении пенетранта на отдельных участках, в углублениях). При выполнении этой операции важно сохранить пенетрант в полости дефектов. Удаление выполняют протиркой сухими и влажными салфетками, промыванием очистителем. Международный стандарт рекомендует сначала применять протирку, а потом промывку. В качестве очистителей используют воду (для пенетрантов на основе скипидара), водные растворы ПАВ и органические растворители. Поверхностно-активное вещество по-

могает образовать эмульсию из нерастворимого в воде пенетранта, после чего он легко смывается, хотя при этом происходит частичное вымывание пенетранта из широких дефектов. Сохранению пенетранта в дефектах способствует промывка сильной струей воды без добавок ПАВ. Здесь очистка обеспечивается механическим действием струи воды. Широко применяют органические очистители, выпускаемые промышленностью: ОЖ-1 (этиловый спирт с эмульгатором) и малокеросиновую смесь.

После промывки ОК сушат; для ускорения сушки обдувают теплым воздухом. Здесь полезно проверить путем осмотра, не осталось ли следов пенетранта на поверхности. В некоторых случаях после или вместо промывки применяют операцию гашения. Это устранение люминесценции или цветового контраста индикаторного пенетранта в результате химического воздействия веществ гасителей. Например, для нориола гасителем является розерцин. С помощью гасителей устраняют фон, возникающий, когда на поверхности изделия имеются неглубокие неровности, например, от механообработки. В этом случае поверхность покрывают 5 %-ным раствором розерцина в воде с добавкой ацетона. Гаситель действует на тонкий поверхностный слой пенетранта, в частности на пенетрант, оставшийся в неглубоких неровностях. На пенетрант, находящийся в полостях дефектов, более глубоких, чем неровности, гаситель не действует. После извлечения из дефектов проявителем пенетрант сохраняет контрастные свойства.

Проявление – это процесс извлечения пенетранта, оставшегося в полости дефектов, и образования индикаций. В качестве проявителя используют порошок, суспензию, краски, лаки, липкую ленту. Важно нанести проявитель равномерно, тонким (порядка 0,1 мм) сплошным слоем. Более толстый слой проявителя затрудняет его пропитку пенетратом, извлеченным из трещин. Малое количество пенетранта не достигает противоположной поверхности слоя проявителя. Сказанное не относится к проявителю в виде липкой ленты.

Проявление порошком (сухой способ) основано на явлении физической адсорбции и капиллярном эффекте. В качестве проявителя используют белый тонкодисперсный (10^{-4} – 10^{-2} мм) порошок оксида магния, углекислого магния, углекислого кальция, талька. Насыпать тонкий ровный слой порошка довольно трудно, поэтому порошок обычно наносят распылением струей воздуха.

Более удобна для нанесения суспензия (мокрый способ). Жидкая фаза суспензии хорошо смачивает поверхность ОК. Применяют суспензию порошка углекислого магния или каолина в воде или спирте. Суспензию наносят погружением в нее ОК, кистью, распылением из аэрозольного баллона или в электрическом поле (как при нанесении пенетранта).

Проявление лаком или краской основано на явлении диффузии. Применяют нитроэмаль, цинковые белила с добавкой растворителя. Промышленность выпускает готовые проявители типов ПР (с различными индексами) и

ЛА. Наносят лакокрасочный проявитель такими же способами, как эмульсию.

Время проявления варьируют от 5 до 25 (в среднем 15) мин в зависимости от свойств проявителя. Жидкие проявители обязательно должны высохнуть. Процесс проявления интенсифицируют чаще всего повышением температуры, реже – вакуумированием, вибрацией (для выявления усталостных трещин).

Важное требование к дефектоскопическим материалам – их совместимость. Выбранный пенетрант должен хорошо смачивать поверхность материала ОК, смываться очистителем без вымывания из дефектов, проявляться рекомендуемым проявителем. Поэтому дефектоскопические материалы рекомендуется употреблять в виде наборов, выпускаемых промышленностью.

Осмотр объекта контроля – очень ответственная операция. При цветном и ахроматическом методах обязательное требование – хорошее освещение поверхности ОК. При применении люминесцентных ламп «дневного света» общая освещенность рабочего места должна быть 300–750 лк, а комбинированная – 750–2500 лк. При использовании ламп накаливания освещенность – 200–500 и 500–3000 лк. Часто применяют бестеневую систему освещения из нескольких ламп. При использовании люминесцентных ламп принимают меры для устранения пульсаций. При люминесцентном способе контроля осмотр проводят в затемненном помещении с подсветкой видимым светом не более 10 лк. Для люминесценции дефектов ис-

пользуют УФ-облучение ртутными лампами с длиной волны 315–400 нм. Их колба состоит из кварцевого стекла, пропускающего УФ-лучи, темного светофильтра, не пропускающего видимое излучение, зеркальный рефлектор, концентрирующий облучение в направлении места осмотра объекта контроля. Промышленностью освоен выпуск нескольких типов аппаратов для УФ-облучения. Для контроля мелких и средних ОК применяют стационарные установки КД-20Л (рисунок 2.5.5, а), а для крупных ОК – переносные установки КД-32Л20Л (рисунок 2.5.5, б) люминесцентного контроля.

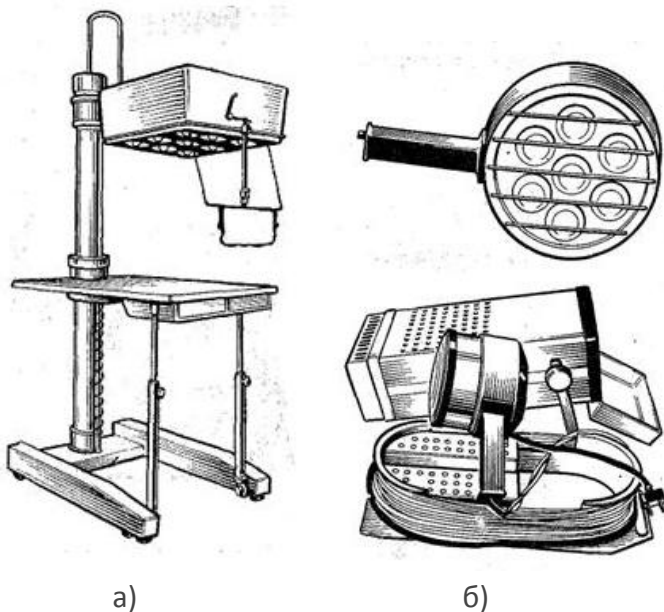


Рисунок 2.5.5 – Стационарная КД-20Л (а) и переносная КД-32Л установка (б) люминесцентного контроля

Ультрафиолетовая облученность объекта контроля должна лежать в пределах $750\text{--}3000\text{ мкВт/см}^2$. Ее проверяют по схеме рисунка 2.5.6, а. В затемненном помещении под проверяемым УФ-облучателем 1 устанавливают белый люминесцентный экран, изготовленный по технологии, изложенной в ГОСТ 18442-80.

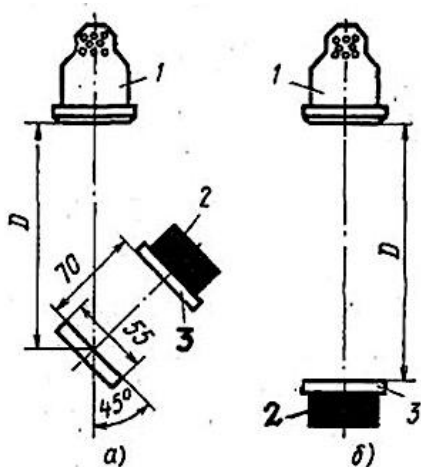


Рисунок 2.5.6 – Схема проверки ультрафиолетовой облученности (а) и подсветки видимым светом (б) от ультрафиолетового облучателя

Расстояние D должно быть равным расстоянию от облучателя до места контроля. Параллельно экрану устанавливают датчик люксметра 2 типа Ю-16 или Ю-116, перед входным окном которого располагают светофильтр 3 из стекла типа ЖС4 толщиной 5 мм. Светофильтр поглощает УФ-излучение и пропускает видимое излучение. Облученность определяют по показаниям люксметра в относительных единицах. За относительную единицу интеграль-

ной облученности принимают облученность, при которой люминесцирующий экран излучает световой поток, создающий освещенность в 1 лк.

Проверяют также подсветку объекта контроля видимым светом, излучаемым УФ-облучателем 1. Для этого датчик 2 с фильтром 3 располагают на месте экрана (рисунок 2.5.6, б). Подсветка не должна превосходить 30 лк.

Чем глубже дефект, тем быстрее появляется изображение, больше яркость и размер индикаций. С учетом этого полезно производить осмотр 2 раза: через 5–10 мин после начала проявления, когда глубокие дефекты дают четкие индикации, правильнее отображающие форму дефекта, и в конце проявления, когда индикации от глубоких дефектов расплылись, но стали более заметными и появились индикации от неглубоких дефектов. Результаты капиллярного контроля заносят в журнал и составляют заключение по НК.

Окончательную очистку объекта после контроля осуществляют влажной протиркой, промывкой водой или растворителем, обдувкой песком или другим абразивным материалом. Пленочный проявитель отклеивают. Иногда выжигают проявитель нагреванием. Если на эксплуатационные качества объекта контроля следы процесса капиллярной дефектоскопии не влияют, то операцию очистки не проводят.

Расход дефектоскопических материалов зависит от качества поверхности контролируемого объекта, ее расположения, консистенции материалов, способа их нанесе-

ния. Расход пенетранта 0,3–0,5 л/м². Большее значение соответствует неровной поверхности объекта контроля, вертикальному расположению поверхности. Очистителя расходуется в 2–3 раза больше, чем пенетранта. Расход порошкообразного проявителя 40–50 г, а суспензии – 300 г на 1 л пенетранта.

2.5.4. Чувствительность капиллярного контроля и ее проверка

Пороги и классы чувствительности. Чувствительность КМК определяют по размеру наименьших выявляемых реальных или искусственно инициированных дефектов. Согласно ГОСТ 18842-80 основным параметром дефекта, по которому оценивают чувствительность, служит ширина его раскрытия. Поскольку глубина и длина дефекта также оказывают существенное влияние на возможность его обнаружения (в частности, глубина должна быть существенно больше раскрытия), эти параметры считают стабильными.

Нижний порог чувствительности, т.е. минимальная величина раскрытия выявленных дефектов ограничивается тем, что весьма малое количество пенетранта; задержавшееся в полости небольшого дефекта, оказывается недостаточным, чтобы получить контрастную индикацию при данной толщине слоя проявляющего вещества. Существует также верхний порог чувствительности, который определяется тем, что из широких, но неглубоких дефектов пе-

нетрант вымывается при устранении излишков пенетранта с поверхности.

Порог чувствительности конкретного выбранного способа КМК зависит от условий контроля и дефектоскопических материалов. Установлено пять классов чувствительности (по нижнему порогу) в зависимости от размеров дефектов (таблица 2.5.1).

Таблица 2.5.1

Классы чувствительности

Класс чувствительности	Минимальная ширина раскрытия дефекта, мкм
1	Менее 1
2	1–10
3	10–100
4	100–500
Технологический	Не нормируют

Для достижения высокой чувствительности (низкого порога чувствительности) нужно применять хорошо смачивающие высококонтрастные пенетранты, лакокрасочные проявители (вместо суспензий или порошков), увеличивать УФ-облученность или освещенность объекта. Оптимальное сочетание этих факторов позволяет обнаруживать дефекты раскрытием в десятые доли мкм.

Не следует без необходимости стремиться к достижению более высоких классов чувствительности: это требует более дорогостоящих материалов, лучшей подготовки поверхности изделия, увеличивает время контроля. Так,

для применения люминесцентного метода необходимо затемненное помещение, ультрафиолетовое излучение, оказывающее вредное действие на персонал. В связи с этим применение этого метода целесообразно только тогда, когда требуется достижение высокой чувствительности и производительности. В других случаях следует применять цветной или более простой и дешевый, яркостный метод. Метод фильтрующейся суспензии – самый высокопроизводительный. В нём отпадает операция проявления. Однако этот метод уступает другим по чувствительности. Комбинированные методы в силу сложности их реализации применяют довольно редко, только в случае необходимости решения каких-либо специфических задач, например, достижения очень высокой чувствительности, автоматизации поиска дефектов, контроля неметаллических материалов.

Проверку порога чувствительности способа КМК согласно ГОСТ 23349-78 выполняют с помощью специально отобранного или подготовленного реального образца ОК с дефектами. Применяют также образцы с инициированными трещинами. Технология изготовления таких образцов сводится к тому, чтобы вызвать появление поверхностных трещин заданной глубины.

Согласно одному из способов образцы изготавливают из листовой легированной стали в виде пластин толщиной 3–4 мм. Пластины рихтуют, шлифуют, азотируют с одной стороны на глубину 0,3–0,4 мм и эту поверхность еще раз шлифуют на глубину около 0,05–0,1 мм. Параметр шеро-

ховатости поверхности – Ra 0,4 мкм. Благодаря азотированию поверхностный слой становится хрупким.

Образцы деформируют либо растяжением, либо изгибом (путем вдавливания шарика или цилиндра со стороны, противоположной азотированной). Усилие деформации плавно увеличивают до появления характерного хруста. В результате в образце возникает несколько трещин, проникающих на всю глубину азотированного слоя.

2.5.5. Объекты капиллярного контроля

Капиллярным методом контролируют изделия из металлов (преимущественно неферромагнитных), неметаллических материалов и композитные изделия любой конфигурации. Изделия из ферромагнитных материалов контролируют обычно магнитопорошковым методом, который более чувствителен, хотя для контроля ферромагнитных материалов также иногда применяют капиллярный метод, если имеются трудности с намагничиванием материала или сложная конфигурация поверхности изделия создает большие градиенты магнитного поля, затрудняющие выявление дефектов. Контроль капиллярным методом проводят до ультразвукового или магнитопорошкового контроля, иначе (в последнем случае) необходимо размагнитить ОК.

Капиллярным методом обнаруживают только выходящие на поверхность дефекты, полость которых не заполнена окислами или другими веществами. Чтобы пенетрант не вымывался из дефекта, глубина его должна быть

значительно больше ширины раскрытия. К таким дефектам относятся трещины, непровары сварных швов, глубокие поры.

подавляющее большинство дефектов, обнаруживаемых при контроле капиллярным методом, может выявляться при обычном визуальном осмотре, особенно если изделие предварительно протравить (дефекты при этом чернеют) и применить средства увеличения. Однако преимущество капиллярных методов состоит в том, что при их применении угол зрения на дефект возрастает в 10–20 раз (за счет того, что ширина индикаций больше, чем дефектов), а яркостный контраст – на 30–50 %. Благодаря этому нет необходимости в тщательном осмотре поверхности и время контроля многократно уменьшается.

Капиллярные методы находят широкое применение в энергетике, авиации, ракетной технике, судостроении, химической промышленности. Ими контролируют основной металл и сварные соединения из сталей аустенитного класса (нержавеющих), титана, алюминия, магния и других цветных металлов. С чувствительностью по классу 1 контролируют лопатки турбореактивных двигателей, уплотнительные поверхности клапанов и их гнезд, металлические уплотнительные прокладки фланцев и др. По классу 2 проверяют корпуса и антикоррозионные наплавки реакторов, основной металл и сварные соединения трубопроводов, детали подшипников. По классу 3 проверяют крепеж ряда объектов, по классу 4 — толстостенное литье. Примеры ферромагнитных изделий, контролируемых ка-

пиллярными методами: сепараторы подшипников, резьбовые соединения.

Желательно, чтобы объект контроля имел гладкую, например, механически обработанную, поверхность. Для контроля по классам 1 и 2 пригодны поверхности после холодной штамповки, прокатки, аргонно-дуговой сварки. Иногда для выравнивания поверхности проводят механическую обработку, например, поверхности некоторых сварных или наплавленных соединений обрабатывают абразивным кругом для удаления застывшего сварочного: флюса, шлаков между валиками шва.

Автоматический контроль применяют для проверки небольших деталей типа лопаток турбин, крепежа, элементов шарико- и роликоподшипников. Установки представляют собой комплекс ванн и камер для последовательной обработки ОК (рисунок 2.5.7). В таких установках широко применяют средства интенсификации операций контроля: ультразвук, повышение температуры, вакуум и т.д., что способствует значительному повышению качества НК.

Транспортер подает детали в ванну для ультразвуковой очистки, затем в ванну для промывки проточной водой. Влагу с поверхности деталей удаляют при температуре 250...300°C. Горячие детали охлаждают сжатым воздухом. Пропитку пенетрантом осуществляют под действием ультразвука или в вакууме. Удаление излишков пенетранта проводят последовательно в ванне с очищающей жидкостью, затем в камере с душевой установкой. Влагу удаляют

сжатым воздухом. Проявитель наносят распылением краски в воздухе (в виде тумана). Детали осматривают на рабочих местах, где предусмотрено УФ-облучение и искусственное освещение. Ответственную операцию осмотра автоматизировать трудно.

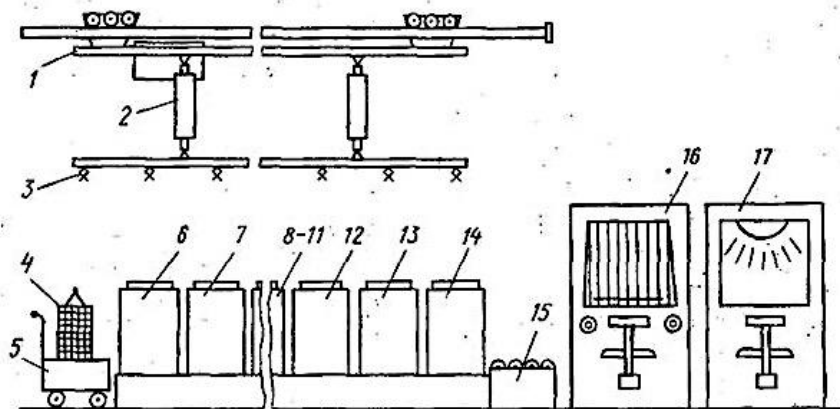


Рисунок 2.5.7 – Схема автоматической установки для контроля деталей капиллярными методами [23]:

- 1 – транспортер; 2 – пневматический подъемник;
- 3 – автоматический захват; 4 – контейнер с деталями;
- 5 – тележка; 6–14 – ванны, камеры и печи обработки деталей;
- 15 – рольганг; 16 – место осмотра деталей в ультрафиолетовом свете и 17 – место осмотра в видимом свете

2.5.6. Условное обозначение обнаруженных дефектов при оформлении результатов капиллярного НК

Обнаруженные дефекты могут быть охарактеризованы по следующим признакам:

По локализации на:


А – единичные;


Б – групповые, расположенные в ограниченных зонах контролируемой поверхности;

В – повсеместно распределенные;


по ориентации относительно главных осей объекта контроля на:

 – параллельные;

 – перпендикулярные;

 – расположенные под углом;

без знака – дефекты, не имеющие преобладающей ориентации; по допустимости:

 – допустимые (малозначительные или исправимые);

без знака – недопустимые (критические, значительные, исправимые).

2. Примечание: обнаруженные дефекты могут быть охарактеризованы по следующим признакам:


По локализации на:


А – единичные;


Б – групповые, расположенные в ограниченных зонах контролируемой поверхности;


В – повсеместно распределенные;

по ориентации относительно главных осей объекта контроля на:

 – единичные допустимые дефекты, расположенные параллельно главной оси объекта;

 – групповые допустимые дефекты, расположенные перпендикулярно к главной оси объекта;

 – повсеместно распределенные допустимые дефекты, расположенные под углом к оси объекта;

 – повсеместно распределенные допустимые дефекты без преобладающей ориентации;

A – единичные недопустимые дефекты без преобладающей ориентации.

Результаты проведения контроля заносятся в бланки заключений.

2.5.7. Преимущества и недостатки методов капиллярного контроля

Преимущества методов капиллярной дефектоскопии перед другими методами неразрушающего контроля являются [24]:

- высокие чувствительность и разрешающая способность;
- наглядность результатов контроля;
- возможность контроля деталей сложной геометрической конфигурации, изготовляемых из широкого спектра материалов;
- простота и универсальность технологических операций контроля;
- относительно низкая стоимость дефектоскопических материалов, аппаратуры и оборудования;
- высокая производительность при поточном контроле;
- возможность применения разных методик с различной чувствительностью.

Основные недостатки капиллярного НК:

- возможность обнаружения только выходящих на поверхность дефектов;

- неприменимость к пористым веществам и материалам химически нестойким (резина, пластмассы) к пенетранту;

- невозможность точного определения глубины дефектов;

- необходимость тщательной подготовки поверхности к проведению контроля, её очистка и удаление проявителя пенетранта после проведения контроля.

2.5.8. Перспективы развития капиллярного контроля

Автоматизация – важное направление развития КМК. Автоматизация капиллярного контроля изделий разного типа, в т.ч. крупногабаритных, возможна с применением адаптивных роботов-манипуляторов, т.е. обладающих способностью приспосабливаться к изменяющимся условиям. Такие роботы успешно используются на окрасочных работах, которые во многом подобны операциям при КМК.

Наиболее трудно поддается автоматизации осмотр поверхности изделий и принятие решения о наличии дефектов. В настоящее время для улучшения условий выполнения этой операции применяют осветители и УФ-облучатели большой мощности. Чтобы уменьшить действие на контролера УФ-излучения, применяют световоды и телевизионные системы. Однако это не решает задачи полной

автоматизации с устранением влияния субъективных качеств контролера на результаты контроля.

Создание автоматических систем оценки результатов контроля требует разработки соответствующих алгоритмов для ЭВМ. Работы ведутся по нескольким направлениям: определение конфигурации индикаций (протяженность, ширина, площадь), соответствующей недопустимым дефектам, и корреляционное сравнение изображений контролируемого участка объектов до и после обработки дефектоскопическими материалами. Кроме отмеченной области, ЭВМ в КМК применяют для сбора и анализа статистических данных с выдачей рекомендаций на корректировку технологического процесса, для оптимального подбора дефектоскопических материалов и технологии контроля.

Важное направление исследований — изыскание новых дефектоскопических материалов и технологии их применения, имеющее целью повышение чувствительности и производительности контроля. Предложено применение в качестве пенетранта ферромагнитных жидкостей. В них в жидкой основе (например, керосине) взвешены ферромагнитные частицы очень малого размера (2–10 мкм), стабилизированные ПАВ, в результате чего жидкость ведет себя как однофазная система. Проникновение такой жидкости в дефекты интенсифицируется магнитным полем, а обнаружение индикаций возможно магнитными датчиками, что облегчает автоматизацию контроля.

Очень перспективное направление совершенствования капиллярного контроля – использование электронного парамагнитного резонанса. Сравнительно недавно получены вещества типа стабильных нитроксильных радикалов. В них имеются слабосвязанные электроны, которые могут резонировать в электромагнитном поле частотой от десятков гигагерц до мегагерц, причем спектральные линии определяются с большой степенью точности. Нитроксильные радикалы стабильны, малотоксичны, способны растворяться в большинстве жидких веществ. Это дает возможность вводить их в жидкие пенетранты. Индикация основывается на регистрации спектра поглощения в возбуждающем электромагнитном поле радиоспектроскопа. Чувствительность этих приборов очень велика, они позволяют обнаруживать скопления 10^{12} парамагнитных частиц и более. Таким образом решается вопрос об объективных и высокочувствительных средствах индикации при капиллярной дефектоскопии.

Контрольные вопросы

1. Сущность капиллярной дефектоскопии.
2. Технологический процесс капиллярного контроля.
3. Материалы, которые можно подвергнуть капиллярной дефектоскопии.
4. Достоинства метода.
5. Недостатки метода.
6. Особенности контроля дефектов с помощью оптической аппаратуры.

7. Какой метод обнаруживает более мелкие трещины – ВИК или КМК?
8. Какой метод позволит обнаружить крупную поверхностную пору ВИК или КМК?
9. Перечислите основные методы капиллярной дефектоскопии.
10. Можно ли упростить технологию КМК и обойтись без операции удаления излишков пенетранта?
11. Зачем в ряде случаев при проведении КМК применяется ультрафиолетовая лампа?
12. Можно ли курить при проведении капиллярной дефектоскопии?
13. Что такое «контрольный образец»?
14. По каким признакам могут быть охарактеризованы дефекты капиллярным методом НК?

3. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

3.1. Радиоволновый метод НК

Полифункциональность радиоволнового метода НК проявляется в диапазоне областей его применения – не только дефектоскопии, а ещё для толщинометрии, контроля внутреннего строения диагностируемых объектов, если они изготовлены из характеризующихся не очень сильным затуханием волновых процессов (диэлектрики – пластмассы, керамика, стекловолокно; магнитодиэлектрики (ферромагнетики), полупроводники, тонкостенные металлические объекты и т. п.), что значительно увеличивает ресурсы неразрушающего контроля ОК.

Среди обширных особенностей радиоволнового контроля по сравнению с оптическим и радиационным методами НК следует отметить использование импедансного метода для расчета параметров сигналов и соизмеримость длины волны излучения с размерами радиоволнового тракта «источник излучения – ОК – приемник излучения». Применение электромагнитных волн сверхвысокой частоты (СВЧ) для целей НК потребовало создания теории их взаимодействия с ОК. Вполне естественно, что в разработанной теории были учтены результаты, полученные в радиосвязи для волновых систем с распределенными параметрами (длинных линий, волноводов и др.) импедансным методом, в котором радиоволновой тракт «источник излучения – ОК – приемник излучения» заменяется моделью в

виде длинной линии с такими же волновыми сопротивлениями и размерами, как в реальной системе. Дефект в виде расслоения заменяется в модели плоскопараллельным слоем такой же толщины, как дефект. В итоге амплитуда сигнала от дефекта уменьшается пропорционально площади, занимаемой дефектом относительно площади контролируемой зоны.

Соизмеримость длины волны излучения СВЧ с размерами элементов радиоволнового тракта обуславливает сложный характер электромагнитного поля в системе НК. По этой причине методика оценки сигналов в системе имеет характерную особенность. Если расстояние между границами различных однородных сред, составляющих исследуемый ОК, превышает длину волны в материале, компоненты электромагнитной волны оценивают на основе законов геометрической оптики. В противном случае предпочтительнее применение импедансного метода. В обоих случаях получаемые оценки сигналов в системе радиоволнового НК – приближенные и не исключено появление больших ошибок. Поэтому рекомендуется пользоваться расчетным методом для определения относительных значений величин – изменения амплитуд сигналов при малых изменениях параметров исследуемого предмета или условий контроля. Что касается абсолютных значений сигналов, их следует оценивать экспериментально. Так, если толщина объекта превышает длину волны используемого зондирующего излучения, рекомендуется для ее измерения использовать геометрический (рисунок

3.1.1) или временной метод. В первом случае контролируемый параметр связан с отклонением положений отраженного луча в плоскости регистрации относительно выбранной системы координат, во втором – с изменением задержки сигнала во времени.

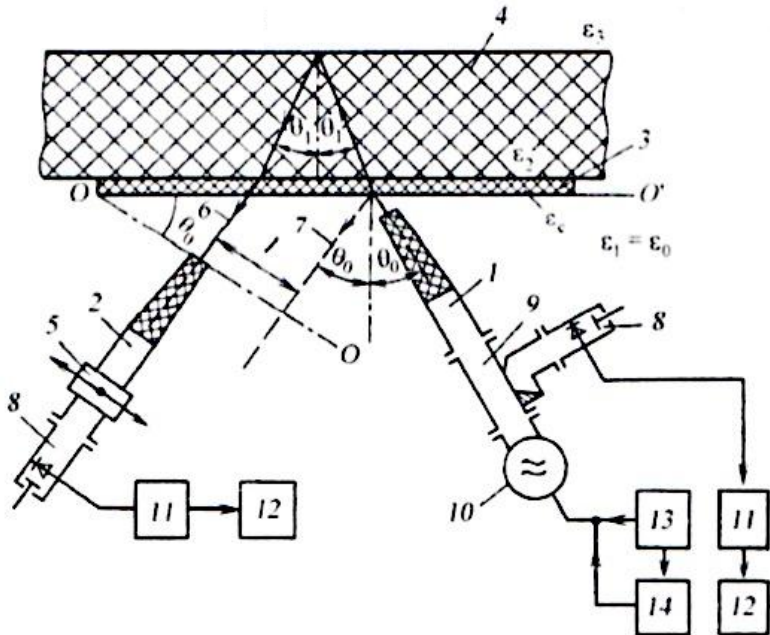


Рисунок 3.1.1 – Блок-схема геометрического метода измерений толщины [29]

1 – передающая антенна (излучатель); 2 – приемно-индикаторная антенна; 3 – согласующая диэлектрическая пластина; 4 – слой ОК; 5 – механизм перемещения приемно-индикаторной антенны; 6 – оптическая ось пучка, отраженного от задней поверхности слоя; 7 – то же, но от передней поверхности без согласующей пластины; 8 – детекторная секция; 9 – направленный ветвитель; 10 – генератор СВЧ; 11 – усилитель низкой частоты (НЧ); 12 – индикатор; 13 – источник питания; 14 – модулятор

Резонансный метод радиоволнового НК основан на введении ОК в резонатор, волновод или длинную линию и регистрации изменений параметров электромагнитной системы (резонансной частоты, добротности, числа возбуждаемых типов колебаний и т.д.). Этим методом контролируются размеры, электромагнитные свойства, деформации (иногда применяют для обнаружения зоны коррозионного поражения, непропаев, расслоений в тонких местах металлических ОК).

Метод отраженного излучения радиоволнового НК позволяет обнаружить дефекты типа нарушения сплошности, определяет их координаты, размеры, ориентацию путём прозвучивания изделия и приёма отраженного от дефекта эхо-сигнала.

В простейшем варианте радиоволновый НК по прошедшему излучению в приемном тракте поддерживают режим бегущей волны. Наиболее полную информацию дает применение многоэлементных антенн, поскольку в этом случае удастся воспроизвести внутреннюю структуру ОК. Для повышения разрешающей способности дефектоскопии используют метод самосравнения. Он реализуется с помощью двух комплектов излучающих и приемных устройств, максимально приближенных друг к другу. Результирующий сигнал определяется разностью амплитуд и фаз сигналов приемников каждого канала. Наличие дефекта приводит к изменению условий распространения волны в одном канале и появлению разностного сигнала. Анализ динамики изменения сигнала при периодическом прохо-

ждении дефекта через зону НК радиоволнового дефектоскопа позволяет снизить порог его чувствительности.

Выделяются несколько разновидностей (методов) радиоволнового контроля [27]:

- активный (метод предполагает облучение объекта радиоволнами);

- пассивный (предполагает анализ собственного радиоволнового излучения контролируемого объекта);

- амплитудный (метод базируется на оценке амплитуды радиоволн);

- фазовый (предполагает анализ фаз радиоволн в процессе взаимодействия с объектом);

- амплитудно-фазовый (метод контроля, предполагающий оценку амплитуд и фаз радиоволн);

- поляризационный (базируется на выявлении параметров поляризации радиоволн);

- резонансный (предполагает анализ резонанса и его характеристик);

- спектральный (метод, предполагающий определение спектра радиоволн);

- рассеянного излучения (предполагает оценку рассеянного объектом излучения);

- свободного пространства (предполагает анализ характеристик радиоволн после взаимодействия с объектом);

- детекторный (метод предполагает оценку параметров радиоволн с помощью детектора);

- болометрический (для замеров используется болометр);
- терморезисторный (для замеров используется терморезистор);
- фотоуправляемой пластины (метод контроля предполагает использование полупроводниковой пластины (пленки) толщиной не более рабочей длины радиоволн);
- жидких кристаллов (для оценки радиоволнового излучения используются кристаллы);
- термобумаг (используются термобумаги);
- термолюминофоров (регистрация параметров радиоволн осуществляется посредством применения термолюминофоров);
- калориметрический радиоволновой контроль (метод, основанный на диагностике посредством калориметра) и др.

При пассивных методах предполагается собственное излучение как самих контролируемых тел, так и сред, расположенных за объектом контроля, в СВЧ-диапазоне. В неразрушающем контроле последние методы пока редко используются. При активных методах используются, как правило, маломощные источники СВЧ-излучения с интенсивностью 1 Вт. По расположению датчиков относительно объекта контроля различают три основных варианта: одностороннее расположение, двухстороннее и под прямым углом оптических осей друг к другу (способ фиксации параметров рассеянного излучения). Резонансные СВЧ-методы делятся по виду резонансного эффекта (электронный

парамагнитный, ядерный магнитный, ферромагнитный, ядерный квадрупольный) и по характеру изменения магнитного поля (с постоянным или меняющимся магнитным полем).

Недостатком СВЧ-метода является сравнительно низкая разрешающая способность устройств, реализующих этот метод, обусловленная малой глубиной проникновения радиоволн в металлы.

Радиоволновые средства НК – это датчики с чувствительным элементом, в котором контролируемая величина преобразуется в информативный параметр. Генераторы СВЧ – источники электромагнитных колебаний, вторичные преобразователи которых предназначены для формирования сигналов регистрации и управления.

Радиоволновые методы НК основаны на взаимодействии электромагнитного поля в диапазоне длин волн от 1 до 100 мм с объектом контроля, преобразовании параметров поля в параметры электрического сигнала и передаче на регистрирующий прибор или средства обработки информации. По характеру взаимодействия с объектом контроля различают методы прошедшего, отраженного, рассеянного излучения и резонансный.

Методы радиоволнового НК позволяют [28]:

- определять толщину и обнаружить внутренние и поверхностные дефекты в изделиях преимущественно из неметаллических материалов;
- обнаруживать дефекты, изменяющие как амплитуду волны, так и ее фазу;

- с высокой точностью и производительностью измерять толщину диэлектрических покрытий на металлической подложке;

- давать достаточно полную информацию о качестве заготовок фольгированных диэлектриков, предназначенных для изготовления отдельных слоев многослойных печатных плат;

- фиксировать изменение плоскости поляризации волны при ее взаимодействии с различными неоднородностями.

Подгруппа активных (включая фазовые, спектральные) методов неразрушающего радиоволнового контроля включает следующие виды:

- при временной разновидности метода оценивать время прохождения радиоволн через ОК;

- геометрический подвид метода дает регистрировать предельное значение интенсивности пучка волн, прошедших через ОК или отраженных от него;

- частотно-фазовый подвид метода предполагает оценку фаз при условии постепенного изменения частоты излучения;

- поляризационно-фазовый подвид метода предполагает изменение поляризации радиоволн;

- эллипсометрический подвид метода дает оценку параметров эллиптически поляризованных излучений после взаимодействия с ОК;

- голографический подвид метода основан на голографии;

- запаздывающей обратной связи подвид метода предполагает оценку времени или фазы запаздывания сигнала (сигналов);

- осуществлять преобразования типа волны, основанные на оценке параметров волны и изменений структуры объекта по результатам их взаимодействия;

- трансформировать отраженное излучение, предполагая оценку параметров отраженного радиоволнового излучения;

- подвид метода биений основан на оценке низкочастотного спектра биений по итогам воздействия частотно-моделированных радиоволн на ОК;

- в случае использования поверхностных волн подвида метода анализировать радиоволны, возбужденные в волноводах (первый – ОК, второй – диэлектрическая антенна).

В процессе реализации мероприятий, направленных на применение радиоволнового НК, могут применяться следующие виды приборов на базе стандартных или модернизированных элементов СВЧ-электромагнитных колебаний:

- дефектоскопы радиоволновые;
- структуроскопы и толщиномеры;
- радиоинтроскопы, в т.ч. квазиоптические;
- рефлектометры;
- эллипсометры, плотномеры;
- преобразователи радиоволновые и др.

3.1.2. Применение радиоволновых методов НК

3.1.2.1. Определение влажности в материалах и изделиях

Для определения влажности в материалах и изделиях применение радиоволнового метода НК основано на двух физических явлениях: поглощении и рассеянии радиоволн, что связано с наличием широкополосной вращательной релаксации полярных водяных молекул в области СВЧ.

Информацию о влажности содержат амплитуда, фаза и угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны как отраженной, так и прошедшей через влажный материал ОК.

Для увеличения эффективности влагомеров могут быть использованы *двухчастотные методы*, когда одна из частот находится в области длины волны X резонансного поглощения электромагнитной энергии молекулами воды (X менее 1 см), или *метод переменной частоты*.

Быстрое и точное измерение влажности необходимо для обеспечения высокого качества многих видов продукции. Применение для этой цели радиоволновых методов НК базируется на контрасте диэлектрических свойств воды и «сухих» (обезвоженных) диэлектрических сред. На рисунке 3.2 приведены зависимости ϵ'_r и $\text{tg}\delta$ воды от частоты электромагнитных колебаний. Анализ показывает, что в коротковолновой части диапазона (длина волны 10 см и менее) зависимость $\text{tg}\delta$ от частоты имеет максимум. Для сухих материалов ОК область значений ϵ'_r и $\text{tg}\delta$:

$$\epsilon'_{\text{см}} = 1,5-10,0 \text{ и } \text{tg}\delta = 10^{-2}-10^{-4}.$$

Таким образом, значения ϵ'_r воды превышают значения $\epsilon'_{см}$ сухих материалов ОК на порядок (таблица 3.1.2), а $\text{tg}\delta$ – в сотни раз.

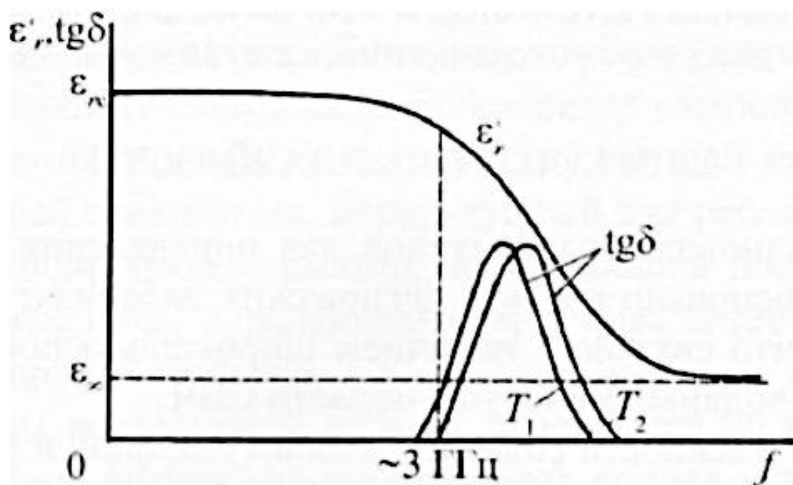


Рисунок 3.1.2 – Зависимости ϵ'_2 и $\text{tg}\delta$ воды от частоты f электромагнитных колебаний [29]:
 T – температура ($T_2 > T_1$)

Таблица 3.1

Зависимость $\epsilon'_{см}$ от влажности W сухих материалов

$W, \%$	1	2	3	4	5	10
$\epsilon'_{см}$	2,08	2.65	3,23	3,80	4,38	7,25

3.1.2.2. Радиоволновой НК толщины металлических листов, диэлектрических материалов, слоев диэлектриков на металле

Радиоволновой метод контроля позволяет не только давать значение содержания влаги в материале, но и определять толщину деталей и узлов из конструкционных

материалов (КМ), выявлять микронеоднородности структуры, степени шероховатости и полимеризации связующего. При прохождении радиоволны через КМ изменяются её параметры, в частности амплитуда, направление поляризации, фаза, вид и плоскость поляризации. Изменения этих величин при прохождении микрорадиоволн через контролируемое изделие или отражении от него характеризуют внутреннее состояние изделия, в частности наличие различных дефектов (расслоение, пористость, трещины, инородные включения, неравномерность распределения связующего, нарушение структуры и т.д.). Одной из основных задач микрорадиоволнового метода является обнаружение этих дефектов в полимерных материалах и особенно в материалах, являющихся непрозрачными для видимого диапазона длин волн.

Радиоволновые методы позволяют получить сведения о толщине металлических листов (в т.ч. при продольной тонко- и толстолистовой прокатке), диэлектрических материалов, слоев диэлектриков на металле в виде информации, которая может содержаться в амплитуде, фазе, смещении резонансной кривой и т.д. Наиболее важными параметрами ОК, влияющими на прошедший или отраженный сигнал, являются толщина и диэлектрическая проницаемость контролируемого материала. Чем однороднее материал, тем точнее измеряется толщина.

На рисунке 3.1.3 представлена одна из схем такого прибора – резонансно-фазового толщиномера.

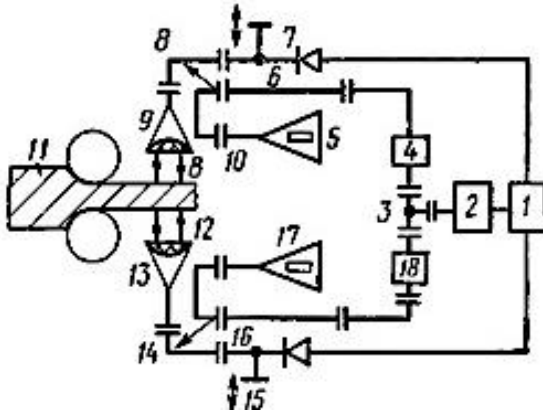


Рисунок 3.1.3 – Схема резонансно-фазового прибора (толщиномера для измерения толщины при прокатке металлического листа) [30]:

- 1 – узел обработки сигналов и выдачи их на индикацию и управление; 2 – клистрон-генератор СВЧ сигналов;
- 3 – тройник; 4, 18 – вентили; 8, 14 – направленные ответвления;
- 5, 17 – согласующие нагрузки; 6, 15 – детекторные секции;
- 9, 13 – излучающие и приемные антенны (рупоры);
- 10, 12 – линзы; 7, 15 – подстроечно-закорачивающие плунжеры

Генерируемые сигналы СВЧ через тройник 3 и вентили 4 и 18 поступают на ответвители 8 и 14, а затем на рупорные антенны 9 и 13 с линзами 10 и 12. Сигналы, отражаясь от поверхностей измеряемого объекта 11, образуют стоячие волны. Резонаторы отраженных волн настраиваются в резонанс короткозамкнутыми плунжерами 7 и 15.

3.1.2.3. Радиоволновый дефектоскоп НК

Эти приборы применяются для контроля трещин, воздушных включений, инородных включений, неоднородностей и т.д.

родностей, дефектов склеивания и др. в диэлектрических материалах.

Радиоволновые дефектоскопы устроены (рисунок 3.1.4) на принципе прохождения или отражения волны, которая несет информацию о толщине слоев и показателя преломления, т.е. о физических параметрах слоев – пористости, плотности, влажности, составе и т.д. ОК 8, посредством использования излучателей 7 и приемников 10 волн.

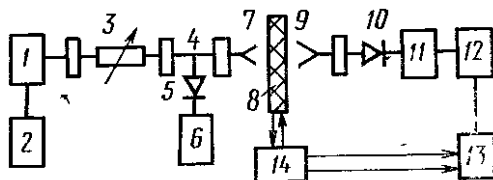


Рисунок 3.1.4 – Радиоволновый дефектоскоп [30]

При проведении радиоволнового НК изделий из КМ наибольшее распространение получили сантиметровые (с длиной волны 1–10 см и частотами 3–30 ГГц) и миллиметровые (с длиной волны 1–10 мм и частотами 30–300 ГГц) микрорадиоволны. В качестве источников микрорадиоволн используют различные типы генераторов – клистроны, магнетроны, лампы обратной и бегущей волны.

3.2. Радиационные методы НК

Под радиационными методами НК понимается вид неразрушающего контроля, основанный на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия с контролируемым объектом. В основе радиационных методов лежит получение дефектоскопиче-

ской информации об объекте с помощью ионизирующего излучения, прохождение которого через вещество сопровождается ионизацией атомов и молекул среды. Результаты контроля определяются природой и свойствами используемого ионизирующего излучения, физико-химическими характеристиками контролируемых изделий, типом и свойствами детектора (регистратора), технологией контроля и квалификацией дефектоскопистов.

Радиационные методы НК предназначены для обнаружения микроскопических нарушений сплошности материала ОК, возникающих при их изготовлении (трещины, овалы, включения, раковины и др.).

Классификация радиационных МНК представлена на рисунке 3.2.1.

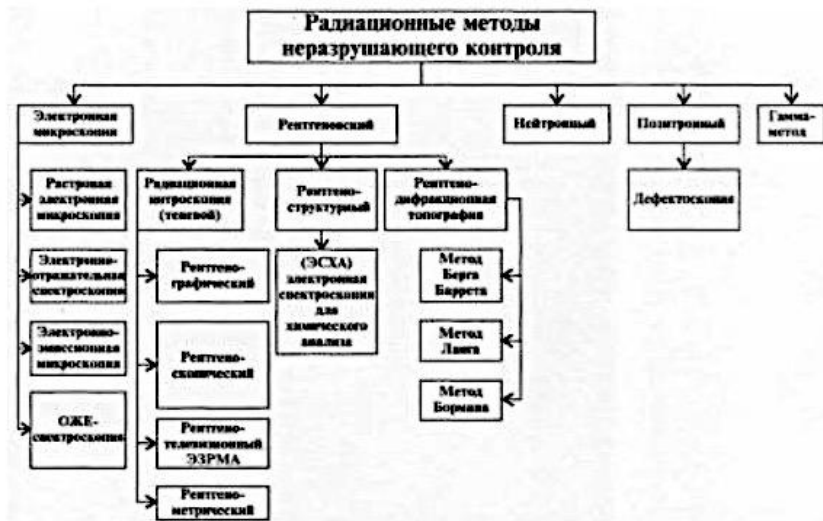


Рисунок 3.2.1 – Классификация радиационного НК [30]

3.2.1. Метод электронной микроскопии (ЭМ)

Метод электронной микроскопии, как одной из разновидностей радиационных методов НК, основывается на взаимодействии электронов с энергиями 0,5–50 кэВ с веществом, при этом они претерпевают упругие и неупругие столкновения. Основные способы использования электронов при контроле тонкопленочных структур реализуются растровой в ЭМ (рисунок 3.2.2).

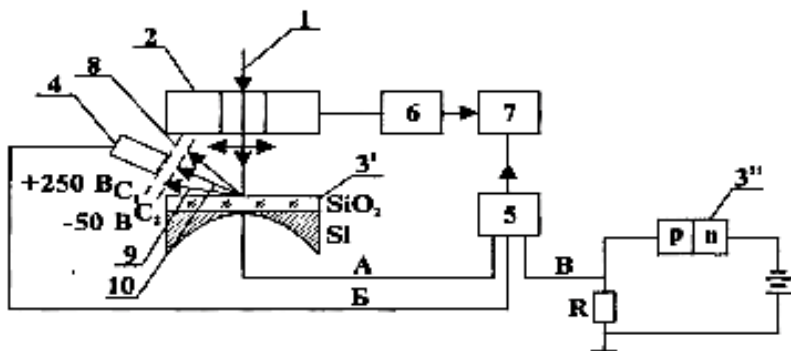


Рисунок 3.2.2 – Режимы работы растровой электронной микроскопии [30]:

- 1 – сфокусированный луч; 2 – отклоняющая система; 3 – объект исследования – диэлектрическая пленка; 4 – детектор вторичных и отраженных электронов; 5 – усилитель;
- 6 – генератор развертки; 7 – ЭЛТ; 8 – сетка детектора; 9 – отраженные электроны; 10 – вторичные электроны

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) основана на поглощении, дифракции электронов взаимодействия с атомами вещества. При этом прошедший через пленку сигнал снимается с сопротивления, включаемого последовательно с образцом 3¹. Для получения изображения на экране используются мощные линзы, располагае-

мые за образцом. Стороны образца должны быть плоскопараллельными, чистыми. Толщина образца должна быть много меньше длины свободного пробега электронов и должна составлять 10–100 нм.

ПЭМ позволяет определить: формы и размеры дислокаций, толщину образцов и профиль пленок. В настоящее время существуют ПЭ-микроскопы до 3 МэВ.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ). В целом изображение СЭМ формируется как за счет вторичных электронов, так и за счет отраженных электронов (рисунк 3.2.2). Вторичные электроны способствуют определению химического состава ОК, а отраженные – морфологию его поверхности. При подаче отрицательного потенциала (– 50 В) происходит запираение малоэнергетичных вторичных электронов и изображение на экране становится контрастным, поскольку грани, расположенные под отрицательным углом к детектору, не просматриваются вообще. Если на сетку детектора подать положительный потенциал (+ 250 В), то вторичные электроны собираются с поверхности всего образца, что смягчает контрастность изображения.

3.2.2. Ионизирующие методы и средства радиационного НК

Радиационные методы НК основаны на использовании свойства ослабления ядерных излучений при прохождении ОК. Интенсивность принятых сигналов зависит от плотности, толщины, наличия трещин, пустот, неоднородностей и т.д.

По виду используемых излучений радиационные методы подразделяются на рентгеновские, изотопные, α -, β - и γ - методы, нейтронные, электронные, позитронные.

На рисунке 3.2.3 представлен прибор радиоскопического контроля, реализующий особенности применения такого вида контроля для определения дефектов в контролируемых объектах. В приборах этого типа рентгеновское γ -излучение или излучение другого вида, прошедшее через ОК, воспринимается детектором, а затем сигнал преобразуется в видимое световое излучение, воспроизводимое на телевизионных или иных экранах и воспринимаемое глазом оператора.

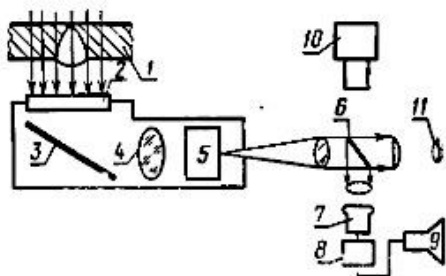


Рисунок 3.2.4 – Схема радиоскопического прибора [30]:

- 1 – контролируемый объект; 2 – сцинтиллятивный экран;
- 3 – зеркало; 4 – линза; 5 – трехкаскадный ЭОУС; оптическая система;
- 6 – перекидное зеркало; 7 – суперортикон; 8 – блок телевизионного канала;
- 9 – телеконтрольное устройство;
- 10 – киноаппаратура; 11 – глаз оператора

Радиоскопические приборы применяются для контроля качества литья, сварных соединений, пайки, сборки, а также для контроля состояния машин и механизмов без их разборки. В качестве источников излучения применяют

радиоактивные изотопы и бетатроны, а в качестве детекторов – электроннооптические преобразователи, сцинтилляционные кристаллы и флуороскопические экраны.

Радиометрические приборы обеспечивают измерение ослабленного пучка излучения, прошедшего через ОК. Интенсивность пучка за ОК измеряют сцинтилляционным, полупроводниковым, газоразрядным счетчиком или ионизационной камерой. Используя измерительные сигналы, выдаваемые радиометрическими приборами, с целью управления непрерывным процессом контроля деталей в процессе производства можно осуществить автоматизацию процесса – разбраковку, воздействие на ход технологического процесса и т.д. рисунок 3.2.5).

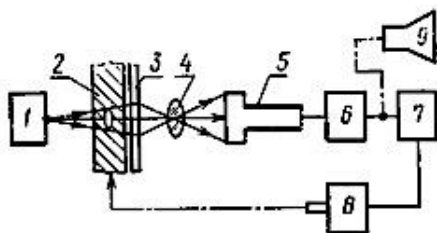


Рисунок 3.2.5 – Схема радиометрического прибора с телевизионной системой [30]:

- 1 – источник излучения; 2 – контролируемый объект;
- 3 – преобразователь излучения; 4 – оптическое устройство;
- 5 – передающая телевизионная трубка; 6 – телевизионный канал;
- 7 – блок обработки видеосигналов; 8 – исполнительное устройство;
- 9 – видеоконтрольное устройство

Стробографиические приборы НК обладают возможностью стробирования световыми импульсами периодически движущегося ОК посредством синхронизации

с периодом его движения, что позволяет наблюдать изображение ОК неподвижным. Частота вибраций ОК может достигать 10 кГц.

Рентгенография и томография в качестве разновидностей радиационного метода НК применяются для обнаружения внутренних дефектов в материалах и изделиях, в т.ч. структурно-многослойных, и основаны на эффекте различного поглощения рентгеновского излучения дефектными и бездефектными средами.

В целом радиационные методы контроля различаются по виду представления окончательной информации о состоянии внутренней структуры изделия. При *радиографическом способе* НК дефектность структуры представляется в виде фиксированного видимого изображения на рентгеновской пленке. При *радиоскопическом способе* НК изображение дефектов и повреждений представляется на флуоресцирующем экране с помощью электронно-оптических преобразователей и оптических усилителей.

Необходимым условием для радиографического контроля является возможность двустороннего подхода к ОК. С одной стороны, ОК устанавливается источник излучения – рентгеновская трубка или другой источник радиационного излучения, а с другой – регистратор – пленка, заключенная в светонепроницаемый конверт. Участки рентгеновской пленки с большими почернениями соответствуют областям с меньшей толщиной и плотностью, чем основной контролируемый материал. Макродефекты внутренней структуры – раковины, трещины, газовые поры на

рентгеновских снимках выявляется в виде темных участков, повторяющих их размер и формы.

Рентгенография позволяет выявлять различные дефекты внутренней структуры: недопрессовки и расслоения, складки в системе армирования, инородные тела в связующем и т.д.

Недостатками рентгенографии являются:

- низкая производительность;
- относительно высокая стоимость, обусловленная использованием серебросодержащей пленки.

Рентгенография как метод НК позволяет получить более точные результаты по сравнению с тепловыми и ультразвуковыми методами НК, однако в точности обнаружения дефектов внутренней структуры конструкционных материалов значительно уступает рентгенографии и томографии.

Методы радиационного НК используются при проведении контроля качества исходных материалов горнообогатительных и металлургических комбинатов – рудного сырья, металлического лома и других материалов, широкое применение в методах НК которых получил прибор (дозиметр) гамма-излучения ДКГ-03Д «ГРАЧ», обладающий следующими положительными характеристиками:

- высокочувствительный дозиметр гамма-излучения;
- удобный прибор для работы при проведении радиационных обследований материалов, деталей, изделий и отходов производства (рисунок 3.2.6);

– результаты измерений и погрешность прибора индицируются непрерывно, с момента начала измерений и до их окончания, постоянно уточняются;

– при достижении необходимой погрешности процесс измерения данным прибором можно завершить.



Рисунок 3.2.6 – Дозиметр ДКГ-03Д «ГРАЧ» [31]

Особенности Дозиметра ДКГ-03Д «Грач»:

- одновременное измерение мощности дозы и дозы;
- независимый перезапуск измерения мощности дозы и дозы;
- замер мощности дозы не ограничен по времени;
- быстрая автоматическая реакция прибора на изменение мощности дозы;
- индикация статистической погрешности в процессе измерения;
- «Щелчки», сопровождающие регистрацию гамма-квантов (отключаемые);

– подсветка табло.

Прибор ДКГ-03Д «ГРАЧ» удобен для оценки радиационной обстановки в связи с наличием звукового сигнала с частотой, пропорциональной мощности измеренной дозы гамма-излучения.

Основные эксплуатационные характеристики прибора (дозиметра) ДКГ-03Д «ГРАЧ» следующие:

- два измерительных канала для измерений мощности дозы и дозы гамма-излучения;

- независимый перезапуск для измерений мощности дозы и дозы гамма-излучения;

- непрерывное измерение гамма-излучения с постоянным уточнением результата измерений;

- оценка радиационной обстановки звуковыми сигналами (щелчками), при этом частота щелчков пропорциональна мощности дозы гамма-излучения;

- индикация статистической погрешности в процессе измерения и получение результата измерений гамма-излучения с необходимой статистической погрешностью;

- быстрый автоматический перезапуск прибора при изменении мощности дозы гамма-излучения;

- индикация единицы измерения гамма-излучения;

- прибор (дозиметр) ДКГ-03Д «ГРАЧ» имеет высокую чувствительность гамма-излучения, а также удобен в работе, т.к. имеет карманный размер (111x28x73 мм), подсветку табло прибора и небольшой вес равный 0,2 кг.

Принцип работы прибора (дозиметра) ДКГ-03Д «ГРАЧ» заключается в следующем:

– фиксация сигналов со счетчика Гейгера-Мюллера типа Бета-2М.

Питание прибора обеспечивается напряжением в 4 Вт, которое создается встроенным высоковольтным адаптером;

– обработка полученных данных процессором и вывод результатов анализа на жидкокристаллический дисплей;

– осуществление постоянной диагностики, непрерывное уточнение результатов и обновление данных.

Основные технические характеристики прибора (дозиметра) ДКГ-03Д «ГРАЧ» следующие:

– детектор (газоразрядный счетчик), который по чувствительности эквивалентен 3 шт. типа СБМ-20;

– диапазон измерения мощности дозы амбиентного эквивалента $H^*(10)$ от 0,1 мкЗв/ч до 1,0 мкЗв/ч и дозы $H^*(10)$ от 1,0 мкЗв до 100 Зв;

– диапазон энергий гамма-излучения от 0,05 МэВ до 3,0 МэВ;

– пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения равны $[15+2,5/H^*(10)]$ %, при этом $H^*(10)$ измеренное значение в мкЗв/ч (мкЗв);

– чувствительность данного прибора равна 20000 имп/мкЗв;

– энергетическая зависимость чувствительности относительно эффективной энергии 0,662 мэВ, не более 25 %;

– вывод информации осуществляется на цифровую индикацию с подсветкой экрана телефона, звукоиндикацию

защитой, также возможно подключение телефона;

- время выхода данного прибора (дозиметра) на рабочий режим равно 5 сек;

- диапазон температур для работы данного прибора (дозиметра) равен от +20 град. С до + 50 ° С;

- влажность для работы данного прибора (дозиметра) при +25 град. С должна быть не более 90 %;

- питание прибора (дозиметра) обеспечивается двумя элементами по 1,5 В типа АА, при этом время непрерывной работы данного прибора (дозиметра) с одним комплектом батарей обеспечена не менее чем на 200 часов.

В комплект заводской поставки входит сам прибор (дозиметр) ДКГ-03Д «ГРАЧ», а также сумка для дозиметр-прибора. Отдельно прикладывается руководство по эксплуатации дозиметр-прибора с гарантийными талонами на обслуживание и ремонт, включая сертификат о проверке дозиметр-прибора и два элемента питания по 1,5 В типа АА.

3.3. Тепловые методы НК

3.3.1. Принципы и особенности тепловые методов НК

Тепловые методы контроля (ТМК) основаны на взаимодействии теплового поля ОК с термодинамически чувствительными элементами (термопарой, фотоприемником и т.д.), преобразовании параметров поля (интенсивности, температурного градиента, контраста, лучистости и др.) в электрический сигнал и передаче его на регистрирующий прибор [32].

По характеру изменения во времени внешнего теплового воздействия на ОК различают следующие виды нестационарных методов и приборов для измерения теплофизических свойств:

- со ступенчатым изменением температуры (теплового потока) во времени;

- с импульсным изменением температуры (теплового потока) на поверхности образца во времени;

- с линейным изменением температуры поверхности образца во времени;

- с периодическим (гармоническим или импульсным) изменением температуры поверхности образца;

- с тепловым воздействием на исследуемый образец за счёт изменения объёмной плотности W ($\text{Вт}/\text{м}^3$) внутренних источников тепла, действующих внутри ОК, например, за счёт пропускания электрического тока;

- через электропроводный образец;

- через электронагреватель, рассматриваемый в качестве одного из слоёв многослойного образца и т. п.

Главным условием применения диагностики с помощью тепловых МНК является наличие в диагностируемом объекте тепловых потоков.

Температура – самое универсальное отражение состояния любого оборудования. При практически любом, отличном от нормального режима работы оборудования, изменение температуры является самым первым показателем, указывающим на неисправное состояние. Температурные реакции при разных режимах работы в силу своей

универсальности возникают на всех этапах эксплуатации электротехнического оборудования.

Наиболее перспективным и эффективным направлением развития ТМК является инфракрасная диагностика, обладающая рядом достоинств и преимуществ в сравнении с традиционными методами НК, а именно:

- достоверность, объективность и точность получаемых сведений;
- дистанционность (для ИК-систем: тепловизоров, тепловых дефектоскопов);
- безопасность персонала при проведении обследования оборудования;
- отсутствие необходимости отключения оборудования и подготовки рабочего места;
- большой объем выполняемых работ за единицу времени;
- возможность определения дефектов на ранней стадии развития;
- диагностика большинства типов подстанционного электрооборудования;
- малые трудозатраты на производство измерений на единицу оборудования;
- возможность контроля при одно- и двустороннем подходе к изделию;
- теоретическая возможность контроля любых материалов;
- многопараметрический характер испытаний;

- возможность взаимодополняющего сочетания теплового метода НК с другими видами НК;
- сочетаемость со стандартными системами обработки информации;
- возможность поточного контроля и создания автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами.

Применение ТМК основано на том, что наличие практически всех видов дефектов энергетического оборудования вызывает изменение температуры дефектных элементов и, как следствие, изменение интенсивности инфракрасного (ИК) излучения, которое может быть зарегистрировано тепловизионными приборами.

Методы, основанные на различных принципах преобразования теплового излучения объекта измерения в непосредственно измеряемую физическую величину, называют бесконтактными или пирометрическими методами измерения температуры, а средства измерения, реализующие эти методы, – пирометрами. Раздел температурных измерений, который изучает методы и средства измерения температуры бесконтактным способом, называют пирометрией.

Контроль теплофизических характеристик объектов является частным случаем *активного* теплового неразрушающего контроля (АКТК), в котором, в свою очередь, реализуются три основных направления его применения:

- тепловая дефектоскопия (ТД);
- тепловая дефектометрия (ТД);

– тепловая томография (ТТ).

Тепловая дефектоскопия состоит в определении факта наличия дефекта и его расположения в ОК. Метод ТД основан на зависимости характера распределения температурного поля на поверхности объекта от факта наличия в нём различных дефектов (трещин, несплошностей и т.д.). В настоящее время это наиболее разработанное направление.

Тепловая дефектометрия – направление АТНК, представляющее методы и средства количественной оценки глубины залегания дефектов, их толщины и поперечных размеров. С математической точки зрения ТД требует решения обратных теплофизических задач.

Тепловая томография является последующим развитием ТД и состоит в послойном синтезе внутренней структуры ОК на основе использования методов проективной компьютерной томографии.

Пассивный тепловой неразрушающий контроль не нуждается во внешнем источнике теплового воздействия (ИТВ) – тепловое поле в ОК возникает при его эксплуатации (энергетическое оборудование, металлургические печи и др.) или изготовлении (закалке, отжиге, сварке и т. п.).

3.3.2. Основные приборы тепловых методов НК

Зависимость спектральной энергетической яркости теплового излучения тела от температуры этого тела положена в основу принципа яркостных пирометров, один из вариантов исполнения которых показан на схеме оптичес-

ского пирометра (рисунок 3.3.1) «с исчезающей нитью». Принцип действия такого пирометра основан на сравнении измерений яркости ОК и яркости градуированного источника излучения в определённой длине волны.

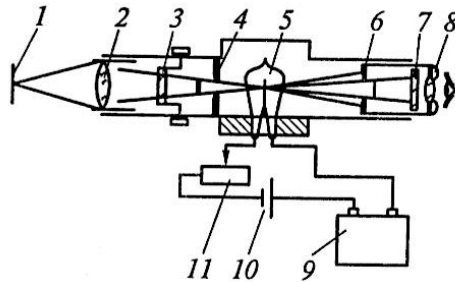


Рисунок 3.3.1 – Схема яркостного пирометра [32]:

- 1 – излучатель; 2, 3 – линзы; 4, 6 – диафрагмы; 5 – нить накаливания; 7 – светофильтр; 8 – линза окуляра;
9 – регистратор; 10 – источник питания; 11 – реостат

Изображение излучателя 1 с линзой 2 и диафрагмой 4 объектива пирометра фокусируется в плоскости нити накаливания 5. Оператор через диафрагму 6, линзу окуляра 8, красный светофильтр 7 на фоне раскалённого тела ОК видит нить лампы. Перемещая движок реостата 11, оператор изменяет силу тока, проходящего через лампу, и добивается уравнивания яркостей нити и излучателя. Момент «исчезания» нити на фоне объекта соответствует равенству яркостей нити и объекта излучения.

Регистрирующий прибор 9 фиксирует силу тока, соответствующую этому моменту, и позволяет произвести считывание результата измерения температуры объекта излучения, °С. Красный светофильтр 7 пропускает область

излучения с шириной около 0,1 мкм и с эффективной длиной волны 0,65 мкм. Данный тип пирометров позволяет измерять температуры в интервале 700–8000 °С. Основная допустимая погрешность измерения для интервала температур 1200–2000 °С составляет ± 20 °С.

Достоинством простых и удобных в работе опико-электронных приборов – пирометров и тепловизоров является их предназначение для бесконтактного наблюдения, измерения и регистрации пространственного/пространственно-временного распределения температуры ОК, находящихся в поле зрения прибора, путем формирования временной последовательности термограмм и определения температуры поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т.п.).

Принцип действия пирометров основан на измерении мощности теплового излучения объекта измерения преимущественно в инфракрасном (ИК) диапазоне (рисунок 3.3.2). Принцип работы тепловизора основан том, что все физические тела нагреты неравномерно, вследствие чего складывается картина распределения ИК-излучения. Тепловизор (рисунок 3.3.3) – это своего рода телекамера, снимающая объекты в ИК-излучении, позволяющая в реальном времени получить картину распределения теплоты (разницы температур) на поверхности ОК. Другими словами, действие всех тепловизоров основано на фиксации температурной разницы «объект/фон» и на преобра-

зовании полученной информации в изображение (термограмму), видимое глазом.



Рисунок 3.3.2 – Внешний вид пирометров [32]



Рисунок 3.3.3 – Внешний вид тепловизора [32]:

а – профессиональный тепловизор; *б* – стационарный тепловизор непрерывного контроля и мониторинга; *в* – простейший компактный переносной тепловизор

Принципиальное отличие тепловизоров от пирометров заключается в том, что пирометры измеряют температуру в конкретной точке (до 1 см), а тепловизоры анализируют весь объект целиком, показывая всю разность и колебания температур в любой его точке.

Недостатки данных приборов – субъективизм, а также то, что измеряется так называемая яркостная температура, которая отличается от действительной. Яркостная температура – условная температура «нечёрного тела», численно равная такой температуре «чёрного тела», при которой их спектральные энергетические яркости равны, вследствие чего для определения действительной температуры следует ввести поправку на степень черноты поверхности объекта.

Функциональная схема цветового пирометра приведена на рисунке 3.3.4. Эти пирометры измеряют цветовую температуру объекта по отношению интенсивностей излучения в двух определенных участках спектра. Основное преимущество таких пирометров заключается в независимости их показаний от излучательной способности объекта, а также от наличия дыма, пыли и испарений в пространстве между объектом и пирометром.

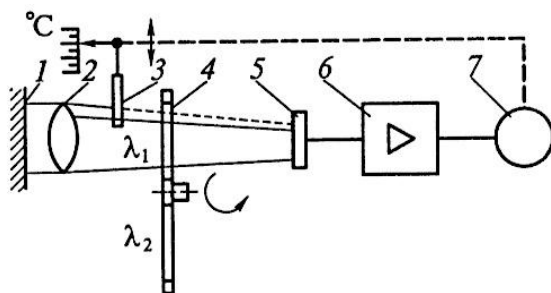


Рисунок 3.3.4 – Функциональная схема
цветового пирометра [32]:

- 1 – объект измерения; 2 – объектив; 3 – фильтр; 4 – обтюратор;
5 – фотоэлемент; 6 – усилитель; 7 – реверсивный двигатель

Световой поток от объекта измерения 1 прерывается обтюратором 4 с двумя светофильтрами, пропускающими излучение на двух длинах волн λ_1 и λ_2 к фотоэлементу 5, что вызывает появление на выходе фотоприемника переменного сигнала, амплитуда которого пропорциональна отношению спектральных светимостей входных потоков света. Таким образом, амплитуда переменной составляющей выходного сигнала зависит от температуры поверхности ОК. Переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника усиливается в усилителе 6 и подаётся на реверсивный двигатель 7, который перемещает уравнивающий фильтр 3 до тех пор, пока не уравниваются интенсивности излучения на обеих длинах волн. В положении равновесия переменная составляющая выходного сигнала фотоприёмника исчезает, а перемещение фильтра 3 является мерой измеряемой температуры. Диапазон измерения от 1000 до 2500 °С. При использовании ИК-фотоприёмников нижний предел температурного диапазона может быть уменьшен до 20–50 °С. Достоинством таких приборов является то, что для «серых» тел измеряется действительная температура. Серым называется тело, степень черноты поверхности которого можно принять постоянной в широком диапазоне длин волн излучения.

На использовании зависимости полной (интегральной) светимости теплового излучения тела от температуры основан принцип действия радиационных пирометров. Приборы такого типа широко используют для измерения низких температур от минус 40°С до +2500 °С.

Приёмники полного излучения отличаются тем, что их спектральная чувствительность постоянна в широком диапазоне длин волн от дальней ИК-области до ближней УФ-области. Для увеличения поглощательной способности чувствительные поверхности приёмников излучения окрашивают в чёрный цвет. Для уменьшения теплоотвода в среду приёмник помещают в вакуумированные или газонаполненные корпуса. В качестве приёмников применяют термобатареи – последовательно соединённые термоэлектрические преобразователи. Их горячие спаи 1 (рисунок 3.3.5) располагаются на узком участке зачернённой поверхности 2, на который фокусируется излучение.

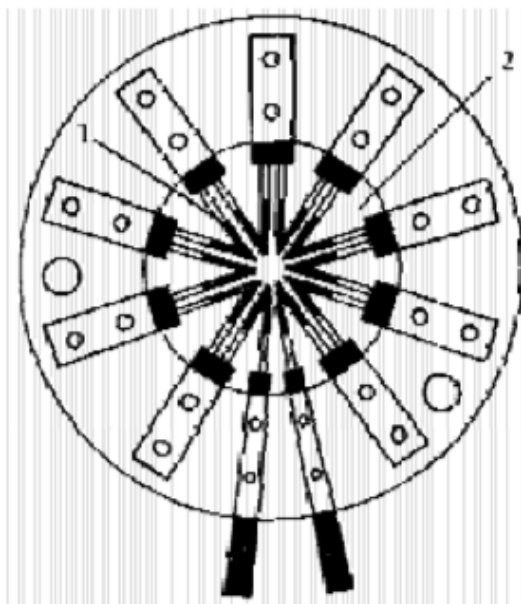


Рисунок 3.3.5 – Конструкция термобатареи [32]

Болометры-приёмники – это термометры сопротивления, изготовленные либо из фольги проводящих материалов, либо из полупроводников (термисторов).

Тепловые быстродействующие индикаторы выполняются в виде тонкослойной термопары или болометра, в которых активный слой имеет хороший тепловой контакт с основанием. Это даёт возможность повысить быстродействие (время успокоения до 10^{-9} с). Они применяются для идентификации мощных сигналов, например, лазерного излучения.

Пирозлектрические приёмники – это кристаллы с определённым видом симметрии, в которых в зависимости от изменения температуры проявляется эффект спонтанной поляризации.

Пирометры полного излучения подразделяются на пирометры с преломляющей оптической системой (рисунок 3.3.6, а) и пирометры с отражающей оптической системой (рисунок 3.3.6, б).

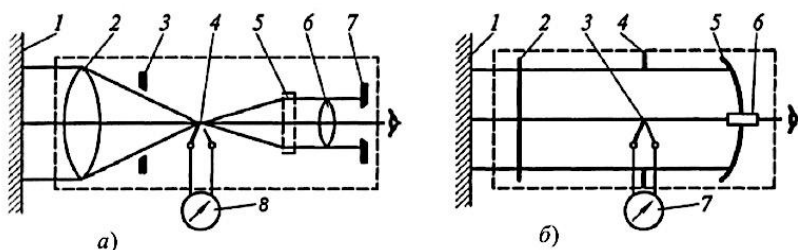


Рисунок 3.3.6 – Схемы пирометров полного излучения [32]

В первом случае излучение от объекта измерения 1 через линзовый объектив 2 и диафрагму 3 поступает на

приёмник полного излучения 4. Для наводки на объект измерения служит окуляр 6 с дымчатым светофильтром 5 и диафрагмой 7. Отсчётным устройством является милливольтметр 8.

В пирометрах с отражающей оптической системой (рисунок 3.3.6, б) излучение от объекта измерения 1 попадает на приёмник излучения 3 после прохождения через защитную полиэтиленовую плёнку 2, диафрагму 4 и зеркальный объектив 5. Для наводки на объект излучения служит зрительная труба 6. Отсчёт показаний производится по шкале милливольтметра 7. Полиэтиленовая плёнка прозрачна для инфракрасного излучения и служит для защиты оптической системы пирометра от загрязнения потоков воздуха.

Контрольные вопросы

1. На чём основаны тепловые методы контроля (ТМК)?
2. Перечислить основные преимущества инфракрасной диагностики (ИК-диагностики) по сравнению с традиционными методами испытаний.
3. Для диагностики каких видов объектов контроля могут быть использованы тепловые методы контроля (ТМК)?
4. Назвать основные приборы, используемые для обследования оборудования тепловыми методами контроля.
5. Объяснить, что такое тепловизор? Для чего предназначен этот прибор и в чём заключается принцип его работы?
6. В каком диапазоне измеряемых температур могут работать тепловизоры?

7. Объяснить, что такое термограмма?
8. Объяснить, что такое пирометры, на чём основано действие этих приборов и для каких целей они применяются?
9. В каком диапазоне измеряемых температур могут работать пирометры?
10. В чём заключается принципиальное отличие тепловизора от пирометра?
11. Какие факторы необходимо учитывать при анализе результатов инфракрасной диагностики?
12. Какие виды дефектов можно определить при инфракрасной диагностике кабелей?

3.4. Оптический метод НК

Оптический неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия оптического излучения с ОК – деталями, изделиями и др.

В оптическом контроле используются электромагнитные волны от ультрафиолетового (УФ) до инфракрасного (ИК) диапазонов, но в основном применяют излучение видимого диапазона (ВИ) с длиной волны 0,2–0,5 мкм. ИК и УФ области являются невидимыми для человеческого глаза. Поэтому для фиксации их параметров в процессе взаимодействия с ОК применяются специальные измерительные приборы. Они различаются в зависимости от типа фиксируемого излучения.

Основными информационными параметрами деталей и изделий, которые определены оптическим контролем, являются их спектральные и интегральные фотомет-

рические характеристики, которые в общем случае зависят от строения вещества, его температуры, физического (агрегатного) состояния, микрорельефа, угла падения излучения, степени его поляризации, длины волны и т.д. При этом к числу дефектов, обнаруживаемых неразрушающими методами оптического контроля качества, относятся пустоты (нарушения сплошности), расслоения, поры, трещины, включения инородных тел, внутренние напряжения, изменение структуры материалов и их физико-химических свойств, отклонения от заданной геометрической формы и т.д.

С помощью методов оптического контроля качества выявляются внутренние дефекты только прозрачных в оптической области спектра деталях и изделиях. Контраст дефекта обусловлен отношением разности энергетических яркостей дефекта и окружающего его фона к одной из них, либо к их сумме, а видимость дефекта – отношением фактического контраста дефекта к его пороговому значению в заданных условиях. При этом использование оптического излучения как носителя информации перспективно вследствие того, что электромагнитное поле по природе многомерно, что позволяет вести многоканальную (многомерную) обработку информации об ОК одним устройством с большой скоростью, определяемой скоростью света в данной среде.

Оптический НК имеет множество разновидностей в зависимости от регистрируемых параметров оптического излучения при использовании методов [33]:

– прошедшего, отражённого, рассеянного, собственно-го индуцированного излучения;

– спектрального, когерентного, амплитудного, временного, геометрического, поляризационного, фазового, интерференционного, дифракционного, рефракционного, абсорбционного, оптико-акустического, фотохимического, фотолюминисцентного, фотокомпенсационного, фотоимпульсного, фотоследящего, голографического, магнитооптического, муаровых полос;

– согласованной фильтрации, разностного изображения, фотоэлектрического эффекта, спекл-структур, спекл-интерферометрии.

В качестве средств оптического НК служат:

– **прибор оптического НК** – системы, состоящей из осветительных, оптических и регистрирующих устройств, а также средств калибровки и настройки, предназначенная для оптического неразрушающего контроля;

– **оптический дефектоскоп**, предназначенный для обнаружения несплошностей и неоднородностей материалов и изделий;

– **оптический структуроскоп**, предназначенный для анализа структуры и (или) физико-химических свойств материалов и изделий;

– **оптический толщиномер**, предназначенный для измерения толщины объектов контроля и (или) глубины залегания дефектов;

– **лазерный дефектоскоп** – уникальный прибор для обнаружения дефектов в различных материалах, принцип

работы которого основан на использовании лазерного излучения – узконаправленного пучка света, который может сканировать и анализировать поверхность объекта, выявляя на нем наличие трещин, включений, коррозии и других дефектов. Он основан на распознавании световых взаимодействий, происходящих между лазерными лучами и материалом. Этот метод не только способен выявлять дефекты, но и оценивать их размеры и глубину.

Сравнивая лазерный дефектоскоп с другими методами неразрушающего контроля, можно отметить следующие преимущества:

- более точные результаты;
- более высокая скорость и производительность;
- нет необходимости в контакте с материалом;
- меньшая интенсивность и доза излучения.

Однако лазерный дефектоскоп также имеет свои недостатки. Использование лазерного метода может быть ограниченным в случаях, когда материал поглощает лазерный свет. Более того, стоимость лазерного дефектоскопа нередко выше по сравнению с другими методами.

В базовый комплект поставки лазерно-ультразвукового дефектоскопа (модель УДЛ-2М) входят:

1. Опто-электронный блок 1 (рисунок 3.3.7) – 1 шт.
2. Волоконно-оптический кабель 2 (600 мкм) – 1,5 м.
3. Преобразователь лазерно-ультразвуковой, модель ПЛУ-6П-01 (рисунок 3.3.8) – 1 шт.
4. Преобразователь лазерно-ультразвуковой, модель ПЛУ-6Н-02 – 1 шт.

5. ПК (ноутбук) с манипулятором мышью – 1 шт.
6. Набор сигнальных и информационных кабелей – 1 шт.
7. Комплект программного обеспечения для ручного контроля – 1 шт.
8. Кейс для транспортировки (промышленный, герметичный) – 1 шт.
9. Набор цифровых измерительных инструментов: 1 микрометр, 1 штангенциркуль.

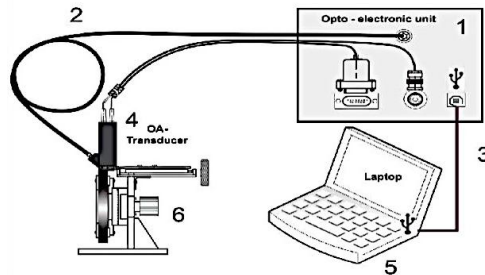


Рисунок 3.3.7 – Лазерно-ультразвуковой дефектоскоп модели УДЛ-2М [36]

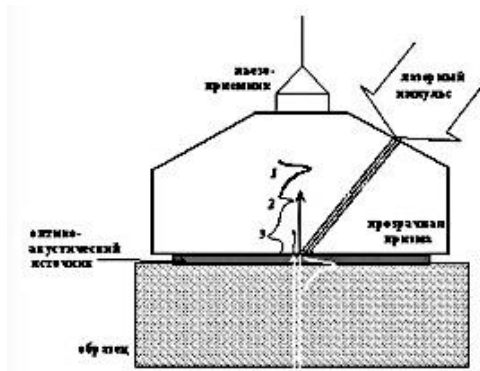


Рисунок 3.3.8 – Схема оптико-акустического преобразователя [36]

В зависимости от используемых оптических элементов различают линзовые («жесткие») и стекловолоконные («гибкие») эндоскопы.

«Жесткие» эндоскопы (рисунок 3.3.9) изготавливают на базе линейной оптики (линзы, призмы и др.), способствующей увеличению (обычно до 7-кратного) изображения ОК, удаленного на расстояние до 30 м от оператора. Их разрешающая способность достигает 60 штр./мм.

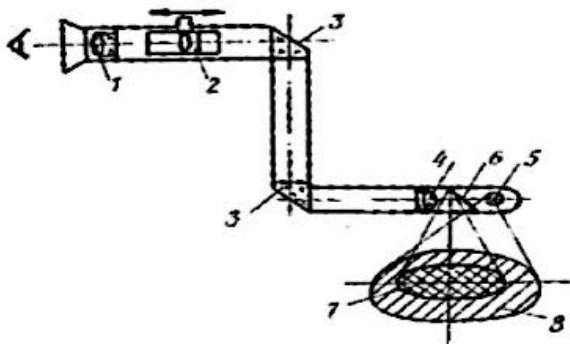


Рисунок 3.3.9 – Оптическая схема «жесткого» эндоскопа [36]

Оптическая схема «жесткого» эндоскопа содержит объектив, окуляр, систему зеркал и призмы. Увеличение и поле зрения эндоскопа зависят от принятой оптической схемы, увеличений объектива и окуляра, а также от расстояния до ОК. Максимальное увеличение эндоскопа достигается при осмотре ОК с расстояния, близкого к фокусному расстоянию объектива (около 10 мм), т.е. когда он действует как микроскоп.

«Гибкие» эндоскопы производят на базе линейных оптических элементов и волоконных светопроводящих жгутов (рисунок 3.3.10). Различают осветительные и оптические жгуты. В осветительном жгуте светопроводящие нити укладывают без определенного порядка и служат только для передачи света для освещения объекта. В оптическом жгуте нити укладывают в строгом порядке, так как они служат для передачи изображения.

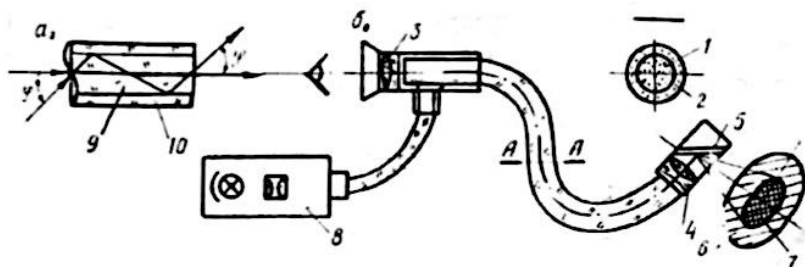


Рисунок 3.3.10 – Оптическая схема «гибкого» эндоскопа: ход лучей в волокне (а) и устройство прибора (б) [36]

Число волокон в жгуте может быть до 10^8 шт., чем достигается достаточно высокая разрешающая способность изображения (до 10 штр./мм). Каждая нить жгута состоит из оптического стекла 9 и имеет светоотражающее покрытие 10, снижающее потери света. Торцы жгута обрабатывают специальным составом, спекают и полируют.

Оптические жгуты способны передавать изображение на значительные расстояния (до 30 м) без существенных потерь световой энергии. При этом они допускают пе-

регибы (до 90° и более), чем достигается высокая универсальность прибора по типу осматриваемых объектов.

Оптическая схема «гибкого» эндоскопа, кроме оптического 1 и осветительного 2 жгутов, содержит объектив 4, окуляр 3 и источник света 8, который через осветительный жгут создает на поверхности ОК поле освещения 6, диаметр которого превышает поле зрения 6 объектива. Отразившись от контролируемой поверхности, свет через зеркало бокового осмотра 5 попадает в объектив. Оптическая схема «гибкого» эндоскопа, кроме оптического 1 и осветительного 2 жгутов, содержит объектив 4, окуляр 3 и источник света 8. Источник света 8 через осветительный жгут создает на контролируемую поверхность ОК поле освещения 6, диаметр которого превышает поле зрения 6 объектива. Отразившись от контролируемой поверхности ОК, свет через зеркало бокового осмотра 5 попадает в объектив 4 с малым фокусным расстоянием (обычно до 10 мм), который создает уменьшенное перевернутое изображение объекта на торце оптического жгута. Точно такое же изображение возникает и на противоположном торце оптического жгута, где его рассматривают через окуляр с большой кратностью увеличения. При этом создаётся уменьшенное перевернутое изображение осматриваемой поверхности с достаточно большим полем зрения.

Наводка на резкость осуществляется перемещением объектива относительно входного торца оптического жгута, а также перемещением окуляра относительно выходного торца жгута.

Оптический дефектоскоп ОД-20Э (рисунок 3.3.11) предназначен для визуального осмотра внутренних поверхностей полых ОК. Прибор позволяет выявлять разнообразные дефекты блока цилиндров и камеры сгорания двигателей внутреннего сгорания (ДВС), в частности.

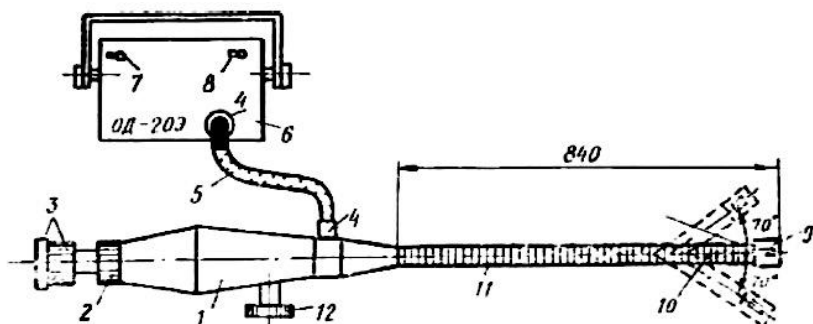


Рисунок 3.3.11 – Конструкция оптического дефектоскопа ОД-20Э [36]

Основные технические данные оптического дефектоскопа ОД-20Э следующие [36]:

Пределы фокусировки, мм	25–1000
Длина объективной части, мм.....	840
Диаметр объективной части, мм.....	14
Угол отклонения объективной части, град.....	± 70
Угол обзора, град.....	25
Разрешающая способность на расстоянии 100 мм от объектива, штр./мм	5
Освещенность контролируемой поверхности на расстоянии 100 мм от объектива, лк.....	5000
Напряжение питания, В.....	220
Потребляемая мощность, Вт.....	250

Масса дефектоскопа с футляром
и осветителем, кг13

Оптический дефектоскоп ОД-20Э изготовлен на базе волоконной оптики. Контролируемая осмотром поверхность ОК с помощью объектива 9 проектируется на торец оптического жгута 10. Изображение на выходном торце жгута рассматривают с помощью окуляра 3. Фокусировку прибора осуществляют вращением кольца 2, который через тросовую проводку перемещает объектив относительно входного торца оптического жгута, а диоптрийную настройку окуляра осуществляют вращением ручки 3.

На корпусе дефектоскопа 1 расположен оптический разъем 4 для подключения осветительного жгута 5. При панорамном обзоре объективная часть тубуса 10 может изгибаться с помощью троса и ручки дистанционного управления 12. При боковом осмотре на объективную часть 11 устанавливают зеркальную насадку 9.

Источник света 6 предназначен для освещения объекта через осветительный жгут 5 и жгут дефектоскопа. На передней панели источника света установлен тумблер выключения питания 7, переключатель режима горения лампы 8 и оптический разъем 4 для подключения осветительного жгута. Оптическая система источника света обеспечивает фокусировку светового потока лампы на торец осветительного жгута. Вентилятор служит для охлаждения лампы и оптических элементов осветителя.

Порядок работы с оптическим дефектоскопом ОД-20Э следующий:

1. Подключить осветительный жгут к разъему источника света и дефектоскопу.

2. Подключить источник света к сети переменного тока (220 В).

3. Переключатель источника света установить на пониженный режим горения лампы.

4. Подать питание на блок освещения (при этом должна гореть лампа освещения и вращаться вентилятор охлаждения).

Эндоскопы применяют и при осмотре цилиндров поршневых ДВС. Осмотр проводят через отверстия в головке цилиндра после демонтажа свечей зажигания (рисунок 3.3.12). При осмотре выявляют риски и следы коррозии на зеркале цилиндра, забоины и коксообразование на головке и клапанах, зависания клапанов, прогары, забоины и коксообразование на днище поршня и т.д.

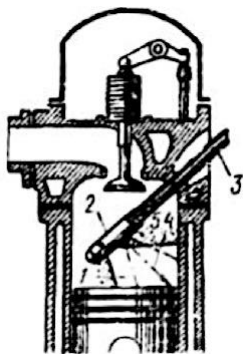


Рисунок 3.3.12 – Схема осмотра камеры сгорания ДВС [36]:

1– днище поршня; 2, 3 – оптическая часть «жесткого» эндоскопа; 4,5 – направления осмотра

С «жесткими» и «гибкими» волоконно-оптическими эндоскопами используются эндоскопические видеосистемы (рисунок 3.3.13), предназначенные для вывода изображения на монитор и документирования результатов осмотра поверхности ОК.

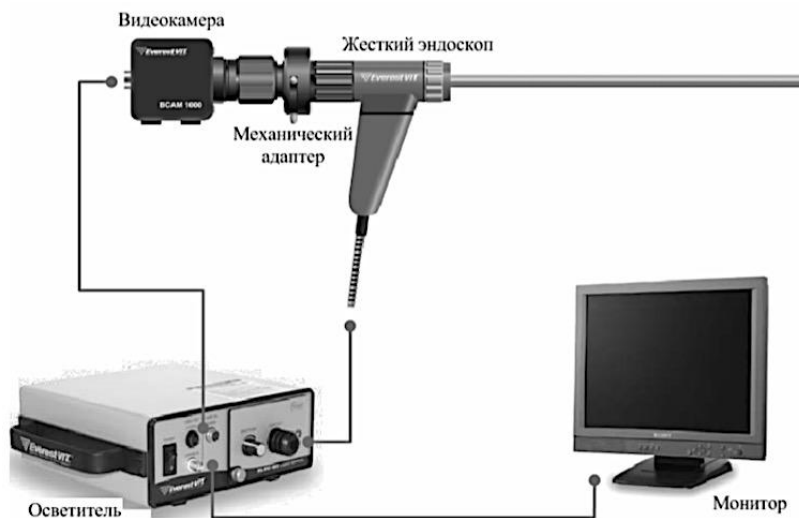


Рисунок 3.3.13 – Схема осмотра камеры сгорания ДВС [38]

В общем случае видеосистема состоит из оптико-механического адаптера с видеокамерой, присоединённого к окуляру эндоскопа, блока управления и монитора. В некоторых случаях блок управления может отсутствовать. Вместо монитора возможно использование бытового телевизора или компьютера с устройством ввода-вывода видеосигнала. Видеокамеры, в зависимости от решаемых задач, изготавливаются черно-белые или цветные. Как

правил, все они имеют разрешающую способность порядка 470 ТВ линий (S-VHS) [38].

Для дистанционного визуально-оптического неразрушающего контроля предназначена система Everest XLG3TM Video Probe (рисунок 3.3.14), которая является усовершенствованным «гибким» эндоскопом на основе видеоизображений. Работая посредством ввода через отверстие для осмотра поверхности ОК, система XLG3 обеспечивает получение изображений с высоким разрешением внутренних видов автомобильных ДВС, их камер сгорания, коробок передач и прочее [38].



Рисунок 3.3.14 – Видеозонд системы Everest XLG3 [38]

Волоконно-оптический пучок зонда освещает участок поверхности ОК с помощью света, формируемого дуговой лампой в 75 Вт с разрядом высокой интенсивности HID (High-Intensity Discharge), установленной в основании прибора. В конце зонда миниатюрная камера преобразовывает изображение в осматриваемой поверхности ОК в электронное изображение и передаёт его через зонд об-

ратно в прибор. Эта система воспроизводит изображение на экране портативного дисплея с органами управления. Никакой фокусировки не требуется, т.к. система XLG3 имеет оптическую систему с большой глубиной резкости [38].

Система XLG3 совместима с различными съёмными устройствами хранения данных: DVD, картами памяти для подключения к компьютеру, картами памяти фотоаппарата, портативными накопителями – с любым совместимым устройством, основывающемся на технологии USB или PCMCIA. Система оснащена измерительными средствами – оптическими наконечниками, с помощью которых можно измерять дефекты и геометрические элементы изображения (детали конструкции) [38].

Визуально-оптический контроль помимо эндоскопического осмотра внутренних поверхностей ОК даёт возможность достоверно оценивать размеры обнаруживаемых дефектов в широком диапазоне ракурсов их наблюдения: длину, ширину, глубину/высоту, площадь, периметр, длину ломаной линии, профиль поперечного сечения дефекта. Для определения размера дефекта на объективе может быть нанесена прозрачная шкала, а к шкале придана переводная таблица, позволяющая по числу делений по шкале и расстоянию от проверяемого участка до точки излома оптической оси эндоскопа измерить величину дефекта.

На рисунке 3.3.15 приведена картина изображения дефектов поверхности (раковины) на фоне измерительной шкалы.



Рисунок 3.3.15 – Вид дефектов в окуляре эндоскопа [38]

Существуют также другие методы измерения геометрических элементов изображений и дефектов:

- стереоскопический;
- теневой;
- сопоставительный (методом сравнения),

для которых требуется использование специальных измерительных наконечников, входящих в комплектацию видеоэндоскопов [38].

Стереонаблюдение – единственный метод дистанционного определения размеров ОК (рисунок 3.3.16). Расстояние до ОК и его размеры определяются по смещению изображений, проецируемых правым и левым объективами на матрицу ПЗС. Анализируя взаимное расположение проекций, система решает тригонометрическую задачу и определяет координаты ОК относительно эндоскопа.

Стереоизмерительная система не имеет жёстких ограничений по расположению эндоскопа относительно ОК. В отличие от других методов, в которых при замере необходимо строго перпендикулярное наблюдение, данная система работает при любом ракурсе наблюдения, под

любым углом к ОК. Это позволяет существенно увеличить точность и упростить процедуру измерений.

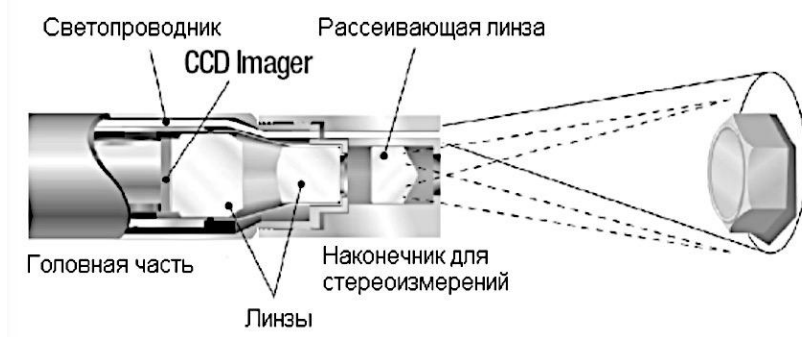


Рисунок 3.3.16 – Технология стереоизмерений [38]

Система сама распознаёт координаты точек, видимых левым и правым объективами. Стереоизмерительная система позволяет определять расстояние между любыми двумя точками на осматриваемой поверхности ОК. Измерение глубины и высоты дефектов можно проводить как с боковыми, так и с торцевыми дистальными адаптерами. Стереоизмерительная система универсальна. Даже при использовании адаптера прямого обзора диапазон углов обзора позволяет измерять глубину и высоту дефекта, сохраняя удобство ориентации. Другой особенностью обычных методов эндоскопических измерений является необходимость наложения различных шкал, сеток и штрихов на изображение дефекта. Эта процедура, требующая незаурядного мастерства и времени, исключена при использовании стереоизмерительной системы [38].

Для стереоскопических измерений требуется использование измерительных наконечников, с помощью которых получают стереоскопические изображения двух изображений одной и той же цели под разными углами. Для измерения цели процессор видеоэндоскопа использует триангуляцию на основе двух таких расположенных друг возле друга изображений.

Наиболее важные особенности стереоскопических измерений следующие [38]:

- точность измерений изогнутых и косых краёв;
- высокая степень достоверности согласования в системе с помощью курсора «match strength» («коэффициент согласования соответствия»);
- пять типов измерений: длина, глубина, кратчайшее расстояние от точки до линии, площадь, посегментное измерение длины.

Принцип теневых измерений состоит в отбрасывании тени вытравленной линии на измерительном наконечнике на исследуемую поверхность ОК и измерении расположения тени в поле зрения (рисунок 3.3.17). При уменьшении расстояния от наконечника до ОК тень движется справа налево через изображение (при обычном размещении) и измерении поперечного расположения тени даёт величину расстояния до ОК. Затем пользователь располагает два курсора поверх изображения для считывания размеров несплошностей. Точность измерений при использовании теневых технологий (рисунок 3.3.18) составляет $\pm 10\%$ и в идеальных условиях может быть $\pm 2\%$.

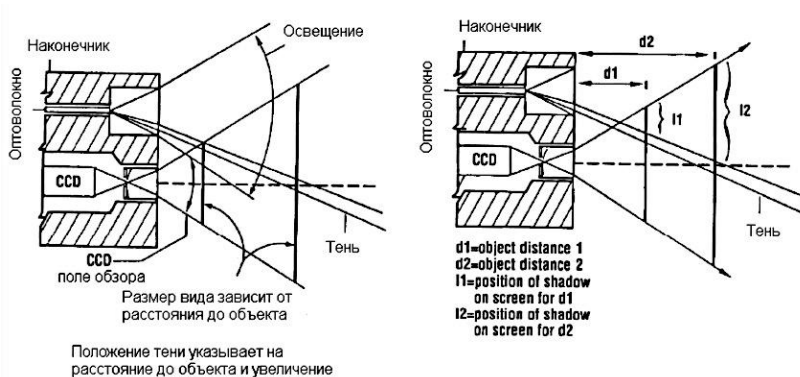


Рисунок 3.3.17 – Схема принципа теневого метода [38]

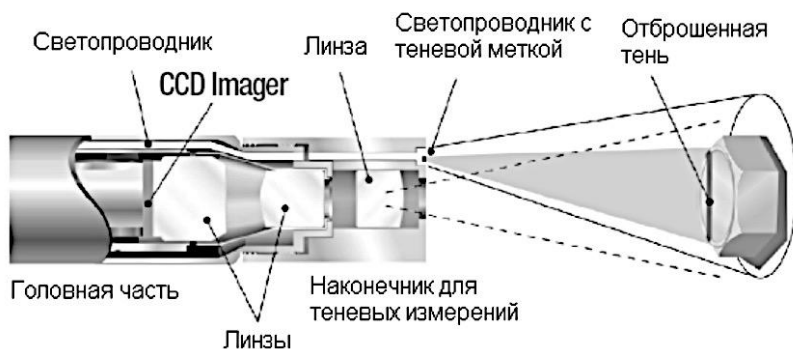


Рисунок 3.3.18 – Технология теневых измерений [38]

Теневой метод может работать на перекошенных (несимметричных) изображениях, но при условии, что измерения делаются вдоль линии отбрасываемой тени.

Наиболее важные особенности системы теневых измерений следующие [38]:

- точность технологии измерения скривленных и скошенных краёв;

– измерение любой точки при выполнении условия перпендикулярности линии визирования зонда к поверхности ОК;

– семь типов измерений: линейное (расстояние между двумя точками), в наклонной плоскости, глубина, кратчайшее расстояние от точки до линии, площадь, посегментное измерение длины.

Контрольные вопросы

1. Какие оптические явления положены в основу оптического неразрушающего контроля?
2. Какие факторы влияют на разрешающую способность (чувствительность) оптического контроля?
3. Какие преимущества и недостатки имеют «жёсткие» и «гибкие» эндоскопы?
4. Каким образом освещаются контролируемые поверхности при использовании эндоскопов?
5. Назовите основные характеристики визуально-оптического метода неразрушающего контроля.
6. Назовите области применения визуально-оптического метода неразрушающего контроля и его разновидностей.
7. Назовите разновидности визуально-оптического метода неразрушающего контроля.
8. Какие принципы заложены в разновидности визуально-оптического метода неразрушающего контроля?
9. В чём заключаются различия «жестких» и «гибких» волоконно-оптических эндоскопов?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение задачи обеспечения высокой надежности автотранспортных средств тесно связано с проблемой повышения уровня контроля состояния деталей узлов и механизмов и агрегатов, испытывающих в процессе эксплуатации усложненные режимы работы по нагрузкам, скоростям, вибрациям и ряду других воздействий. Выполнение требований высокой надежности возможно посредством применения дополняющих друг друга методов контроля, среди которых особая значимость принадлежит методам неразрушающего контроля, предусматривающих выявление дефектов без повреждения объектов контроля, а иногда даже без их разборки. Это достигается путем использования физических методов, связанных с анализом результата воздействия на объект контроля излучений и полей различной физической природы. Особенно важное значение методы неразрушающего контроля приобретают при проверке качества объектов контроля в процессе эксплуатации. В настоящее время неразрушающий контроль является неотъемлемой частью производства и эксплуатации в энергетике, химическом производстве, авиации, морском, на транспорте и ряде других отраслей промышленности.

За короткий срок неразрушающий контроль выделился в самостоятельную отрасль технических наук. Он основывается на комплексном применении самых различных областей физики: оптики, акустики, электромагнетизма, газовой динамики, физики твердого тела, атомной фи-

зики и др. Для работы в области неразрушающего контроля необходимо владеть знаниями в области прочности материалов, технологии производства продукции, метрологии, математической статистикой, теорией распознавания образов, спектральным и импульсным анализом и т.д. Обеспечение приборной базы неразрушающего контроля основано на применении электроники, электротехники, автоматики, вычислительной техники, точного приборостроения.

Большое количество используемых методов неразрушающего контроля, основанных на различных физических законах, позволяет расширить границы применимости для обнаружения скрытых дефектов внутренней структуры конструкционных материалов, в т.ч. слоистых пластиков на различных матрицах, трехслойных конструкций с наполнителем, радиопрозрачных изделий и т.д.

На возможность эффективного применения того или иного метода неразрушающего контроля влияют такие параметры, как габариты установки для контроля изделий из конструкционных материалов, производительность оборудования, наличие специфических требований – одно- или двусторонний подход к объекту контроля, применение специальных реагентов и компонентов в процессе контроля, состояние поверхности объекта контроля и т.д.

Передовые достижения в смежных областях науки быстро осваиваются и совершенствуются в неразрушающем контроле. Лазерная техника, голография, ядерный магнитный резонанс используются в приборах и методах

контроля, причем на основе оптической голографии развилась акустическая вычислительная голография. Микропроцессоры применяются для распознавания образа дефекта, управления процессом контроля и т.д.

Перспективы развития методов неразрушающего контроля тесно связаны с применением вычислительной техники и роботизацией производственных процессов. Применение вычислительной техники позволяет автоматизировать наиболее сложный и ответственный этап контроля – принятие достоверного решения. Роботизация контроля продукции открывает большие возможности для гибких производственных систем и является особенно существенной при вредных или опасных производственных условиях.

Затраты на неразрушающий контроль быстро окупаются снижением производственных и эксплуатационных расходов, повышением качества функционирования и надежности технических объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Неразрушающий контроль НК: виды, методы, цели. – URL: <https://tehnoprogress.ru/presscentr/articles/vidy-metody-nerazrushayushchego-kontrolya/?page=2> (дата обращения: 05.02.2024).

2. Методы неразрушающего контроля. – URL: <https://triadacompany.ru/uslugi/promekspertiza/vizualno-izmeritelnyj-kontrol> (дата обращения: 05.02.2024).

3. Визуальный и измерительный контроль: с этого начинается дефектоскопия. – URL: <https://defektoskopist.ru/osnovi-nk/vizualnyj-i-izmeritelnyj-kontrol.59/#ponyatie-vizualnogo-i-izmeritelnogo-kontrolya> (дата обращения: 07.02.2024).

4. Набор шаблонов сварщика WG АЛЬФА-НДТ (16 шаблонов с первичной калибровкой). – URL: <https://alfandt.ru/katalog/vizualnyy-i-izmeritelnyy-kontrol/shablony-dlya-svarki-i-aksesuary-vik/nabor-shablonov-svarshchika-wg-16-shablonov/> (дата обращения: 07.02.2024).

5. УШС «Тапирус»: комплект с чехлом и опорами. – URL: https://tech.niir.ru/catalog/vizualno_izmeritelnyy_kontrol_1/shablony_1/1430/?utm_source=yandex_poisk& (дата обращения: 07.02.2024).

6. Приборы для измерения шероховатости. Профилометры, профилографы и их модификации. – URL: https://www.штангель.рф/info/articles/Pribori_sherohovatosti.htm (дата обращения: 07.02.2024).

7. Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля. – URL: <https://a3-eng.com/stati/magnitoporoshkovyj->

metod-nerazrushayushhego-kontrolya.html (дата обращения: 07.02. 2024).

8. Магнитные методы неразрушающего контроля. – URL: <https://pandia.ru/text/80/245/71861.php?ysclid=lsd9vpwf8d8497035> (дата обращения: 08.02. 2024).

9. Троицкий, В.А. Магнитные методы неразрушающего контроля / В.А. Троицкий. – URL: <https://preview/3766649/> (дата обращения: 08.02. 2024).

10. ТИ-ТДИ-ЗА Источник зондирующих импульсов (генератор). – URL: <https://www.samarapribor.ru/main/ti-tdi-za.html/> (дата обращения: 09.02. 2024).

11. Лазерно-ультразвуковой контроль. Применение в микроэлектронике. – URL: <https://soyuzmash.ru/docs/prez/prez-kpsu-281117-1.pdf> (дата обращения: 10.02. 2024).

12. Методы акустического контроля. – URL: https://studme.org/206741/tehnika/metody_akusticheskogo_kontrolya (дата обращения: 10.02. 2024).

13. Зацепин, А.Ф. Акустический контроль: в 2 ч. Ч. 1. Введение в физику акустического контроля / А.Ф. Зацепин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – 88 с. – URL: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/2667/1/Zazcepin_2.pdf (дата обращения: 10.02. 2024).

14. Ультразвуковая дефектоскопия, основы, понятия. – URL: <https://mydocx.ru/11-56375.html> (дата обращения: 11.02. 2024).

15. Ультразвуковой дифракционно-временной метод НК (Time of Flight Diffraction – ToFD). – URL: <http://tofd-ru.ru/tofd> (дата обращения: 11.02. 2024).

16. Ультразвуковой контроль. Теория и практика. – URL: <http://ekolinknk.ru/data/1/Leczii.pdf> (дата обращения: 11.02. 2024).

17. Ультразвуковой контроль (УК). Неразрушающий контроль. ИКБ «Градиент». – URL: http://ndtgrad.ru/article_58_ultrazvukovoi-kontrol-metod-nk.htm (дата обращения: 11.02. 2024).

18. Иванов, В. Актуальные проблемы АЭ диагностирования / В. Иванов // Всероссийская конференция с международным участием «Актуальные проблемы метода акустической эмиссии», 13–16 апреля 2021, Санкт-Петербург: сборник материалов / Межгосударственный координационный совет по физике прочности и пластичности материалов [и др.]; ред. коллегия: д.т.н. А.В. Федоров [и др.]. – Санкт-Петербург: Свен, 2021. – С. 3.

19. Вихретоковый контроль – электромагнитный метод дефектоскопии чёрных, цветных металлов и не только. – URL: <https://defektoskopist.ru/osnovi-nk/vixretokovyj-kontrol.56/> (дата обращения: 12.02. 2024).

20. Основы вихретокового неразрушающего контроля: учеб. пособие / А.Л. Бобров, К.В. Власов, Е.В. Лесных; Сиб. гос. ун-т путей сообщения. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2022. – 123 с. – ISBN 978-5-00148-238-3

21. Серебряков, А.С. Электротехническое материаловедение. Проводниковые, полупроводниковые и магнитные материалы: учеб.-методич. пособие / А.С. Серебряков. – Москва: Центр по образованию на ж.-д. трансп., 2008. – 372 с. – ISBN 978-5-89035-510-2.

22. Бобров, А.Л. Основы магнитного неразрушающего контроля: учеб. пособие / А.Л. Бобров, Е.В. Лесных. – Новосибирск: Изд-во Сиб. гос. ун-та путей сообщения, 2018. – 91 с. – ISBN 978-5-93461-899-6.

23. Методы контроля проникающими веществами. – URL: <https://vactron.ru/index.php/library/lecture/100-metody-kontrolya> (дата обращения: 16.02. 2024).

24. Капиллярный контроль – простой и наглядный способ обнаружения трещин, пор и раковин. – URL: <https://defektoskopist.ru/osnovi-nk/kapilljarnyj-kontrol.33/> (дата обращения: 16.02. 2024).

25. Калиниченко, Н.П. Контроль проникающими веществами. Капиллярный метод контроля: учебн. пособие / Н.П. Калиниченко, Г.П. Кулешова. – Томск: ТПУ. – 1999. – 34 с.

26. Методы дефектоскопии деталей машин: лаборат. практикум: учеб.-метод. пособие / Е.А. Зверев, Г.И. Смагин, Н.Д. Яковлев, Н.В. Вахрушев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 38 с. – ISBN 978-5-7782-2985-3

27. Неразрушающий радиоволновой контроль: методы, особенности. – URL: <https://tehnoprogress.ru/nerazrushaushij-radiovolnovoj-kontrol-metody-osobennosti/> (дата обращения: 16.02. 2024).

28. Радиоволновой метод неразрушающего контроля. – URL: <https://eam.su/lekcija-18-obshhie-polozheniya-nerazrushayushhego-kontrolya.html> (дата обращения: 16.02. 2024).

29. Техническая диагностика. Радиоволновой контроль. – URL: https://sd.perm.ru/referat/2011/ref_37.pdf (дата обращения: 16.02. 2024).

30. Приборы радиоволнового неразрушающего контроля. – URL: <https://studfile.net/preview/7149864/page:33/> (дата обращения: 17.02. 2024).

31. Дозиметр гамма-излучения ДКГ-03Д «Грач». Руководство по эксплуатации. – URL: <https://ntcexpert.ru/documents/dkg-03d-grach-manual.pdf> (дата обращения: 17.02. 2024).

32. Неразрушающий контроль: учебн. пособие. – URL: <https://www.tstu.ru/book/elib/pdf/2016/latyshenko.pdf> (дата обращения: 18.02. 2024).

33. Контроль неразрушающий оптический. Термины и определения. – URL: <http://kronos-msk.ru/g/gost-24521-80> (дата обращения: 18.02. 2024).

34. Бражников, А.И. Бесконтактный одноканальный времяимпульсный расходомер жидкости / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, Е.Л. Иванов // *Металлург.* – 2004. – № 11. – С. 16–25.

35. Brazhnikov, A.I. Ultrasonic control of the fluid-flow velocity without N.I. Brazhnikov's undocking of a pipeline / A.I. Brazhnikov, V.A. Belevitin, F.I. Brazhnikov, E.L. Ivanov // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics.* – 2006. – Т. 79. – No 2. – С. 345–353.

36. Визуально-оптический контроль авиационных конструкций с применением жёсткого линзового и гибкого волоконного эндоскопов: электрон. метод. указания к лаб. работе / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. И.М. Макаровский; С.Н. Тиц. – Электрон. текстовые и граф.

дан. (0,54 Мбайт). – Самара, 2010. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

37. Ультразвуковой лазерный многофункциональный дефектоскоп УДЛ-2М. – URL: https://avek.ru/production/nerazrushayushiy_kontrol/ul_trazvukovoy_kontrol/ultrazvukovoy_defektoskop/ul_trazvukovoy_lazernyy_mnogofunktsional_nyy_defektoskop_udl_2m.html (дата обращения: 19.02.2024).

38. Калиниченко, Н.П. Визуальный и измерительный контроль: учебн. пособие для подготовки специалистов I, II и III уровня / Н.П. Калиниченко, А.Н. Калиниченко. – 2009. – Томск: Изд-во Томского политехн. ин-та. – 300 с. – ISBN 978-5-98298-709-9.

39. Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль качества кованых валов / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 47–48.

40. Голубчик, Р.М. О выборе оптимального соотношения диаметров валков и заготовки для винтовой прокатки / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин // Сталь. – 1982. – № 8. – С. 64–66.

41. Смирнов, Е.Н. Развитие подходов к исследованию на физических моделях механизмов «залечивания» дефектов сплошности осевой зоны непрерывнолитой заготовки / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, В.А. Белевитин и [др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59. – № 5. – С. 322–327.

Учебное издание

Белевитин Владимир Анатольевич

Неразрушающий контроль технической диагностики

Учебное пособие

ISBN 978-5-907869-02-8

Работа рекомендована РИС ЮУрГГПУ

Протокол № 30 от 2024 г.

Редактор Е.М. Сапегина

Компьютерная верстка В.А. Белевитин

Фото на обложке вверху:

<https://analytprom.ru/wp-content/uploads/2013/08/оригинал.jpg>

Фото на обложке внизу:

https://www.technosphera.ru/files/book_pdf/0/book_617_393.pdf

Издательство ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Подписано в печать 22.03.2024 г.

Формат 60x841/16

Объем 8,5 уч.-изд. Л.

Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

