

Таблица 6.5 – Технические характеристики магнитопорошковых дефектоскопов

Тип дефектоскопа или намагничивающего устройства, номер технических условий	Составные части	Технические характеристики						Назначение, способ контроля
		Напряженность магнитного поля без детали, А/см, не менее	Вид намагничивающего тока, максимальное эффективное или амплитудное значение, А, не менее	Диаметр рабочего отверстия соленоида (или расстояние между полюсами электромагнита), мм, не менее	Напряжение питания, В	Габаритные размеры, мм, не более	Масса, кг, не более	
МД-12ПШ	Блок питания	–	–	–	220	275×520×320	45	Контроль шеек и предподступичных частей оси колесной пары, других деталей диаметром до 150 мм, СПП
	Неразъемный соленоид	В центре соленоида 180*	Переменный, 45	200	36	–	9	
МД-12ПЭ	Блок питания	–	–	–	220	275×520×320	45	Контроль шеек оси колесной пары, хвостовика автосцепки и других деталей диаметром до 180 мм, СПП
	Эксцентричное НУ (соленоид с плоским сердечником)	В центре соленоида 120*	Переменный, 36	235	36	–	9	

МД-13ПР	Блок питания	–	–	–	220	380×280×15	14	Контроль средней части оси колесной пары в сборе МВПС сухим способом, бандажа, СПП
	Блок контроля с разъемным соленоидом	В центре соленоида 160*	Переменный, 1320	240	3,5	–	82	
МД-12ПС	Блок питания	–	–	–	220	275×520×320	45	Контроль деталей длиной > 600 мм и диаметром ≥ 100 мм, когда для выявления дефектов требуется напряженность ≤ 25 А/см, СПП
	Седлообразное НУ	Под дугой 150*	Переменный, 46	270 (диаметр дуги)	36	–	17	
	Блок контроля с разъемным соленоидом	В центре соленоида 160*	Переменный, 1320	240	3,5	–	82	
УНМ-300/2000 (УНМД-300/2000)	Блок питания	–	–	–	220	300×350×450	30	Контроль деталей с поперечным размером ≤ 50 мм (болты, валики и т. п.), СПП
	Соленоид 2-секционный	В центре соленоида, 160	Переменный, 6	70	27	–	–	
			Постоянный, 2	–	–	–	–	То же, СОН

### 6.11.2 Феррозондовый метод НК

Феррозондовый метод НК основан на измерении феррозондовым преобразователем (ФЗП) магнитных *полей рассеяния*, созданных дефектом в предварительно намагниченном изделии и предназначен для выявления подповерхностных дефектов типа нарушений сплошности: волосовин, плен, трещин, ужимов, закатов, раковин и др.

Впервые на железнодорожном транспорте феррозондовый метод был применён в 1952 г. в дефектоскопах типа МРД-52 для контроля рельсов, лежащих в пути. В последующие годы он использовался в дефектоскопах типа ДФ (ДФ-1, 103, 105, 201 и т. д.), при дефектоскопировании литых деталей грузовых вагонов. Это применение связано с одной из самых важных особенностей метода – нечувствительностью к шероховатости контролируемой поверхности. Так, метод может быть реализован на объектах с шероховатостью поверхности до  $R_z = 320$  мкм (необработанное литьё и штампованные детали), при этом он позволяет выявлять поверхностные дефекты глубиной 3 и длиной 2 мм, шириной раскрытия 0,1 мм, а также подповерхностные достаточно развитые дефекты, залегающие на глубине до 10 мм.

*Чувствительность феррозондового контроля* определяется совокупностью физических факторов (магнитными свойствами материала контролируемого изделия, типом дефектов и их ориентацией, шероховатостью контролируемой поверхности, способом контроля и намагничивания деталей, чувствительностью ФЗП и электронной аппаратуры, способом обработки сигнала ФЗП). ГОСТ 21104-75 [49] устанавливает пять условных уровней чувствительности (таблица 6.6).

Таблица 6.6 – Параметры дефектов, определяющие условные уровни чувствительности

Условные уровни чувствительности	Минимальные размеры выявляемых дефектов, мм		Максимальная глубина залегания дефекта, мм
	ширина (раскрытие)	глубина	
<i>Поверхностные</i>			
А	0,1	0,2	–
Б	От 0,1 до 0,5	От 0,2 до 1,0	–
<i>Подповерхностные</i>			
В	0,3	0,5	10
Г	0,3	От 0,5 до 1,0	10
Д	От 0,3 до 0,5	От 0,5 до 1,0	5
<p><i>Примечание</i> – Минимальная длина выявляемого дефекта определяется поперечными размерами преобразователей и их шагом сканирования, и она должна быть 2 мм и более. Выявляемость дефектов, соответствующих условным уровням чувствительности метода, определяется при отношении сигнал/шум преобразователя, равном не менее 1,5.</p>			

Чувствительность контролируют на стандартных настроечных образцах, имеющих естественные или искусственные дефекты.

Феррозондovому контролю подвергаются боковые рамы и надрессорные балки тележек грузовых вагонов, балансиры и соединительные балки тележек, рамы тележек ЦМВ, КВЗ И2, КВЗ-ЦНИИ, корпуса автосцепок, тяговые хомуты поглощающих аппаратов и др. (таблица 6.7).

Следует учитывать ложные срабатывания индикаторов дефектоскопов, не связанные с дефектами (структурная неоднородность материалов, магнитные пятна, шероховатость контролируемой поверхности, неоднородность намагничивающего поля), именуемыми помехами или фоном. Этот недостаток устранен при использовании дефектоскопов с автоматической (зависящей от фона) настройкой порога чувствительности.

#### *Технические средства феррозондового контроля изделий*

К средствам феррозондового контроля относятся: дефектоскопные феррозондовые установки, включающие в себя два дефектоскопа-градиентометра или магнитоизмерительных комбинированных прибора, феррозондовые преобразователи, намагничивающие устройства, стандартные образцы предприятий (СОП); дополнительные устройства, в состав которых входят измерители напряженности магнитного поля, зарядная станция, компьютер, преобразователь интерфейса.

#### **Феррозондовые дефектоскопы**

Приборы, используемые для феррозондового контроля, можно разделить на три группы:

- дефектоскопы-градиентометры ДФ-103, ДФ-105, ДФ-201.1. Прибор ДФ-201.1 позволяет автоматизировать форму отчетности дефектоскописта;
- приборы магнитоизмерительные феррозондовые комбинированные Ф-205.03, Ф-205.30 (совмещают функции дефектоскопов и измерителей поля);
- приборы для измерения напряженности магнитного поля (МФ-107, МФ-109) или градиента напряженности поля (ГФ-105).

Дефектоскопы-градиентометры ДФ-103, ДФ-105, ДФ-201.1 работают с фиксированным значением порога, что позволяет контролировать детали сравнительно простой формы.

Приборы магнитоизмерительные феррозондовые комбинированные Ф-205.03, Ф-205.30 позволяют работать как с фиксированным значением порога, так и со следящим порогом, что уменьшает вероятности пропусков дефектов и ложных срабатываний на деталях сложной формы.

Приборы для измерения напряженности поля МФ-107, МФ-109 или градиента напряженности поля ГФ-105 служат для периодических проверок намагниченности деталей намагничивающими устройствами и для проверки значений градиента над дефектами отраслевых стандартных образцов.

В настоящее время для феррозондового контроля деталей ПС используются дефектоскопы ДФ-201.1, а также комбинированные магнитоизмерительные приборы – дефектоскопы Ф-205.03, Ф-205.30А, Ф-205.38.

Дефектоскопы комплектуются феррозондовыми преобразователями с базой 3 или 4 мм, питаются от аккумуляторной батареи.

### **Феррозондовые преобразователи**

При проведении контроля феррозондовым методом поля рассеяния обнаруживаются не с помощью ферромагнитных частиц, скапливающихся над дефектами как при проведении магнитопорошкового метода, а с помощью чувствительных феррозондовых преобразователей.

Феррозондовый преобразователь реагирует на резкое пространственное изменение напряженности магнитного поля над дефектами и преобразует градиент напряженности поля<sup>1)</sup> в электрический сигнал и сравнении результата измерения с порогом срабатывания дефектоскопа.

Неоднородность магнитного поля в конкретной его точке характеризуется градиентом напряженности  $\text{grad}H = dH / dx$ . Для однородных магнитных полей  $dH/dx = 0$ , для неоднородных  $dH/dx > 0$ .

Выбор феррозондовых преобразователей в качестве индикаторов магнитного поля рассеяния над дефектами в намагниченной детали обусловлен рядом преимуществ: малой потребляемой мощностью, незначительными габаритами, высокой надежностью работы, высоким КПД и избирательностью к локальным магнитным полям рассеяния.

Феррозонд является преобразователем активного типа, преобразующим действующую на него напряженность внешнего постоянного поля в ЭДС, кратную по частоте питающему его переменному току. Преобразование оказывается возможным благодаря нелинейности магнитных характеристик его сердечников.

Феррозондовые преобразователи, применяемые при контроле деталей подвижного состава, подразделяются:

– на феррозонды-полемеры, предназначенные для измерения абсолютной величины напряженности магнитного поля и преобразования ее в электрический сигнал;

– феррозонды-градиентометры, используемые для измерения градиента напряженности магнитного поля между двумя точками контролируемой поверхности детали.

В *феррозонде-полевом* обмотки возбуждения соединены встречно, а измерительные – последовательно. Для обнаружения дефектов и оценки пространственной неоднородности стационарного магнитного поля используется *феррозонд-градиентометр*.

---

<sup>1)</sup>*Градиент* (от лат. *gradiens* – шагающий, растущий) – вектор, своим направлением указывающий направление наибольшего возрастания некоторой величины, значение которой меняется от одной точки пространства к другой, а по величине (модулю) равный скорости роста этой величины в данном направлении.

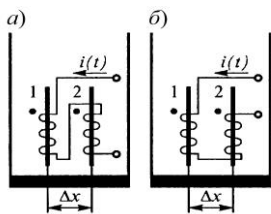


Рисунок 6.42 – Схема включения обмоток ФП:

*a* – для измерения градиента напряженности поля; *б* – для измерения напряженности поля

От феррозонда-полемера он отличается тем, что катушки возбуждения в нем включены последовательно, а измерительные катушки – встречно (рисунок 6.42).

Датчик феррозонда имеет один или два стержня из магнитомягкого ферромагнетика с большой магнитной проницаемостью (*пермаллой*), на которые намотаны катушки индуктивности.

#### Феррозондовые установки

Назначение, перечень и состав феррозондовых установок и применяемых с ними дополнительных устройств приведены в таблицах 6.7 и 6.8.

Таблица 6.7 – Перечень деталей вагонов, контролируемых феррозондовым методом, и применяемых при этом установок

Деталь	Феррозондовая установка
<i>Тележки грузовых вагонов</i>	
Боковая рама, надрессорная балка при контроле в составе тележки 18-100	8-ДФ-103/ 105 8-ДФ-201/205
Боковая рама, надрессорная балка при контроле в составе тележки 18-493	7-ДФ-201/205
Боковая рама тележек 18-100,18-493 при контроле подетально	9-ДФ-201/205
Надрессорная балка тележек 18-100,18-493 при контроле подетально	5-ДФ-201/205
Боковая рама, надрессорная балка тележки 18-100 и соединительная балка, входящие в состав тележки 18-101	4-ДФ-201/205
Боковая рама, надрессорная балка, шкворневая балка, балансир тележки 18-102	3-ДФ-201/205
Надрессорная балка тележек 18-100,18-493 (после изготовления на заводе)	51-ДФ-201/205
Боковая рама тележек 18-100,18-493 (после изготовления на заводе)	91-ДФ-201/205
<i>Тележки пассажирских вагонов</i>	
Надрессорная балка, рама тележек КВЗ-ЦНИИ, КВЗ-5	2-ДФ-201/205
<i>Детали и узлы тележек рефрижераторных вагонов</i>	
Надрессорная балка, рама тележек КВЗ-И2, ЦМВ	6-ДФ-201/205
<i>Автосцепное устройство</i>	
Корпус автосцепки, тяговый хомут автосцепных устройств СА-3 и СА-3М	1-ДФ-103/105 1-ДФ-201/205
<i>Цельнокатаные колеса пассажирских вагонов</i>	
Диск колеса	11-ДФ-205

### Намагничивающие устройства

Детали и узлы большого размера (например, тележки грузового или пассажирского вагона) намагничивают стационарными намагничивающими устройствами с использованием электромагнитов.

Приставные намагничивающие устройства и системы используются для намагничивания сравнительно небольших деталей сложной формы (например, автосцепки), когда разработка стационарных намагничивающих устройств экономически нецелесообразна или для намагничивания участков деталей в тех направлениях, в которых намагнитить стационарными установками не удается.

Таблица 6.8 – Состав феррозондовых установок

Феррозондовая установка	Дефектоскоп	Намагничивающее устройство (НУ)	Стандартные образцы предприятия (СОП)
1-ДФ-103	ДФ-103	МСН 11-01 (2 шт.) МСН 12-01	СОП-НО-022 СОП-НО-023
1-ДФ-105	ДФ-105		
1-ДФ-201	ДФ-201.1		
1-ДФ-205	Ф-205.03 /205.30А		
2-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 21 МСН 12-01	СОП-НО-025
2-ДФ-205	Ф-205.03 /205.30А	МСН 11 МСН 11-02 МСН 11-03	СОП-НО-024
3-ДФ-201	ДФ-201.1		
3-ДФ-205	Ф-205.03 Ф-205.30А		
4-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 10, МСН 11	СОП-НО-021 СОП-НО-024
4-ДФ-205	Ф-205.03 /205.30А		
5-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 31	СОП-НО-021
5-ДФ-205	Ф-205.03/205.30А		
6-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 22 МСН 14	СОП-НО-025
6-ДФ-205	Ф-205.03 Ф-205.30А		
7-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 10-03 МСН 14	СОП-НО-021
7-ДФ-205	Ф-205.03/205.30А		
8-ДФ-103	ДФ-103	МСН 10, МСН 14	СОП-НО-021
8-ДФ-105	ДФ-105		
8-ДФ-201	ДФ-201.1		
8-ДФ-205	Ф-205.03 /205.30А		
9-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 32, МСН 14	СОП-НО-021
9-ДФ-205	Ф-205.03/205.30А		
11-ДФ-205	Ф-205.03/205.30А	МСН 14 (2 шт.)	СОП-НО-026
51-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 33	СОП-НО-021
51-ДФ-205	Ф-205.03/205.30А		
91-ДФ-201	ДФ-201.1	МСН 14 МСН 34	СОП-НО-021
91-ДФ-205	Ф-205.03/205.30А		

Намагничивающие устройства являются составной частью феррозондовых дефектоскопных установок и предназначены для создания магнитного потока в контролируемом объекте или в его отдельных участках. Область применения каждого устройства определяется руководящим документом [50].

Электромагнитные стационарные НУ имеют различное назначение:

– МСН 10 (01, 02, 03, 07) предназначено для намагничивания боковых рам и надрессорных балок тележек моделей 18-100 и 18-493 и составных частей тележек модели 18-101 грузовых вагонов (рисунок 6.43);

– МСН 21, 22 предназначены для намагничивания боковых рам и надрессорных балок тележек моделей КВЗ-ЦНИИ, КВЗ-5 и ЦМВ пассажирских и рефрижераторного вагонов;

– МСН 31 (33), 32 (34) предназначены для намагничивания надрессорных балок и боковых рам тележек моделей 18-100 и 18-493 грузовых вагонов.

Устройства электромагнитные намагничивающие МСН 10, 21, 22 предназначены для контроля деталей СПП, а МСН 31, 32 – СОН.

Основные технические характеристики некоторых стационарных НУ приведены в таблице 6.9.

**Таблица 6.9 – Технические характеристики стационарных НУ**

Тип намагничивающих устройств	Характеристика				
	Номинальное напряжение питающей сети, В	Напряжение питания электромагнитов, В	Ток электромагнитов, А	Продолжительность включения электромагнитов, с	Потребляемая мощность, В·А, не более
МСН 10 (01, 02, 03, 07)	220±22	27–35	12–18	5–9	2000
МСН 21		4–6	0,5–15	–	–
МСН 22			3,0–4,5		
МСН 31 (33)		2,5–4,5	0,5–1,2	–	–
МСН 32 (34)	1,5–2,5	1,0–1,5	–	–	

Для намагничивания некоторых участков деталей в направлениях, которые не могут быть созданы стационарными устройствами, используют приставные устройства и системы с постоянными магнитами:

– МСН 11 (02, 03) предназначены для намагничивания корпуса автосцепки, деталей тележки модели 18-102 и соединительной балки тележки модели 18-101;

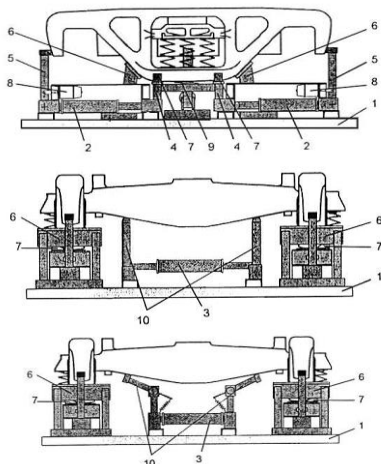
– МСН 12-01 предназначены для намагничивания тягового хомута автосцепного устройства и зева корпуса автосцепки;

– МСН 14 предназначены для намагничивания участков боковой рамы тележек моделей 18-100 и 18-493;

– МСН 18 для намагничивания участков литых надрессорных балок тележек модели ЦМВ пассажирского и рефрижераторного вагонов.



Рисунок 6.43 – Устройство электромагнитное намагничивающее МСН 10: а – боковой рамы МСН 10.01; б – наддресорной балки МСН 10.02; в) наддресорной балки МСН 10.07; 1 – фундамент; 2 – электромагниты; 3 – электромагнит; 4 – полюс-опоры; 5 – подвижные замыкатели магнитного потока; 6, 7 – ловители, базирующие тележку в продольном и в поперечном направлении соответственно; 8 – пневмоцилиндры; 9 – концевой выключатель; 10 – стойки-полюса



Основные технические характеристики некоторых приставных НУ приведены в таблице 6.10

Таблица 6.10 – Технические характеристики приставных НУ

Тип намагничивающих устройств	Характеристика			
	Размер рабочих поверхностей полюсных наконечников, мм	Максимальное расстояние между полюсами, мм	Значение магнитной индукции, создаваемое устройствами на тест-образце из стали, мТл, не менее	Диаметр полюсного наконечника, мм
МСН 11	240 × 15	800	25*	–
МСН 11-02		600		
МСН 11-03		1000		
МСН 11-01	160 × 20	400	60*	–
МСН 12-01	–	840	330**	65
МСН 14	–	800	660**	69

\*При расстоянии между полюсами 100 мм.  
 \*\*При расстоянии между полюсами 400 мм.

Приставные устройства выполняются в переносном исполнении, что позволяет контролировать отдельные зоны, не перемещая деталь. Расстояние между полюсами можно изменять, используя особенности конструкции устройства (рисунок 6.44).

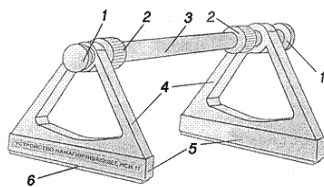


Рисунок 6.44 – Намагничивающая система МСН 11 (11-02, 11-03):

- 1 – кассета с постоянными магнитами;  
 2 – полосный наконечник; 3 – треугольный магнитопровод; 4 – штанга; 5 – цанговый зажим; 6 – ограничительная гайка

В намагничивающих системах МСН 11, МСН 11-01 кассеты с постоянными магнитами можно перемещать, используя штангу и цанговые зажимы.

В приставных намагничивающих устройствах МСН 12-01, МСН 14 и МСН 18 смещение полюсов возможно благодаря применению гибкого магнитопровода.

### Стандартные образцы предприятия (СОП)

Стандартные образцы предприятия предназначены для проверки работоспособности и настройки феррозондовых дефектоскопов перед проведением контроля. Входят в состав установок дефектоскопных феррозондовых.

Стандартные образцы предприятия состоят из намагничивающего устройства с регулировкой магнитного потока и стальной пластины с искусственным дефектом. Градиент поля над этим дефектом равен градиенту над минимальным допустимым дефектом контролируемой детали. Масса одного образца составляет не более 1,5 кг.

Пластину СОП длиной 300 мм и толщиной 8 мм изготавливают из стали Ст3 или стали 20 ГФЛ. На пластине имеется один или три нормированных искусственных дефекта (ИД), выполненных электроискровым инструментом.

Основные характеристики СОП приведены в таблице 6.11. Погрешность воспроизведения градиента напряженности магнитного поля составляет  $\pm 5\%$

Таблица 6.11 – Основные характеристики СОП

Стандартный образец	Значение градиента над дефектом, А/м <sup>2</sup>	Конструкция СОП
СОП-НО-021	6 500 ± 325	
СОП-НО-022	10 500 ± 500	
СОП-НО-023	12 000 ± 500	
СОП-НО-024	6 500 ± 325	
СОП-НО-025	6 500 ± 325	
СОП-НО-028	6 500 ± 325	
СОП-НО-029	15 000 ± 500	
СОП-НО-030	10 000 ± 500	
СОП-НО-031	15 000 ± 500	

### *Технология феррозондового контроля деталей*

Технологический процесс контроля состоит из следующих операций.

#### *1 Подготовка к контролю:*

– намагничивающих устройств, предусматривающая их внешний осмотр (состояние блока питания, надежность соединения шнура питания и соединительных кабелей, наличие заземления, исправность переключателей, тумблеров, подвижных узлов, надежность крепления гибкого магнитопровода к полюсам, надежность цанговых зажимов);

– дефектоскопа, включающая внешний осмотр, проверку работоспособности и настройку с помощью СОП; при внешнем осмотре проверяют целостность электронного блока, сетевого и соединительных кабелей и других составных частей дефектоскопа;

– деталей, предусматривающая внешний осмотр с целью выявления трещин, рисок, забоин, электроожогов на всех поверхностях; выявленные видимые дефекты устраняют методами, предусмотренными нормативно-технологическими документами; детали с выявленными недопустимыми дефектами феррозондovому контролю не подлежат; феррозондовый контроль проводится до выполнения сварочных работ, а при необходимости и после их выполнения при температуре менее 40 °С.

#### *2 Проведение контроля.*

Феррозондовый контроль включает в себя намагничивание деталей и обнаружение дефектов.

Намагничивание деталей проводят специализированными НУ (стационарными электромагнитными или приставными с постоянными магнитами). Допускается в соответствии с нормативными документами [50, 51] производить намагничивание деталей в составе контролируемого узла.

Контроль поверхностей деталей с целью обнаружения дефектов выполняется по способу СПП или СОН. Перед контролем оператор должен знать зоны контроля и характер возможных в этих зонах дефектов, описание которых приведено в технологических или нормативных документах.

Зоны контроля сканируют ФЗП, установленном нормально к поверхности контролируемой детали, со скоростью до 8 см/с и с шагом от 3 до 15 мм, без отрывов от поверхности детали. Продольная ось ФЗП, проходящая через его сердечники, должна совпадать с направлением сканирования на прямолинейном участке детали и быть параллельной касательной к радиусу кривизны на криволинейных участках.

Контроль сварных швов осуществляют сканированием ФЗП вдоль оси сварного шва: околошовной зоны – не менее трех раз с шагом 3–5 мм; зоны сопряжения сварного шва с основным металлом; валика усиления сварного шва.

При срабатывании индикаторов дефектов дефектоскопа находят точку поверхности детали, соответствующую максимуму показаний стрелочного

или цифрового индикатора, и отмечают ее маркером. Выполняют параллельные перемещения ФЗП с шагом 5 мм (справа, слева, ниже, выше), отмечая мелом точки, соответствующие максимумам показания индикатора (до прекращения срабатывания индикаторов).

По полученным точкам определяют размеры дефекта.

Если визуально дефект не обнаруживается, то зачищают отмеченный участок металлической щеткой, осматривают его с помощью лупы и переносной лампы; при обнаружении дефекта место зачищают шлифовальной машинкой, повторяют контроль. Если индикаторы не срабатывают, то исключают дефект из рассмотрения, если срабатывают – оценивают направление и протяженность дефекта (трещины).

Из рассмотрения исключают сигналы индикаторов дефекта:

- не подтверждающиеся при параллельных перемещениях ФП;
- вызванные неоднородностью магнитного поля, обусловленной конструкцией детали (острые кромки, выступы, ступенчатое сечение и т. д.);
- в зоне магнитных пятен (на участках размещения полюсов магнитов);
- появляющиеся при пересечении границы зоны наклепа.

### *3 Принятие решения по результатам контроля.*

Если обнаруженный дефект в контролируемой детали является браковочным признаком (например, трещины поперечные и наклонные в нижнем поясе надрессорной балки тележки 18-100), то деталь бракуют. Если дефект является устранимым (например, трещины продольные суммарной длиной < 250 мм в верхнем поясе надрессорной балки тележки), то деталь ремонтируется сваркой.

### *4 Оформление результатов контроля.*

Феррозондовый метод, обладает следующими достоинствами:

- а) высокая чувствительность к магнитному полю (до  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  А/м);
- б) малая чувствительность к загрязнению деталей и нанесённым лакокрасочным покрытиям;
- в) эффективность для контроля литых и штампованных деталей с шероховатостью до  $R_z = 320$  мкм;
- г) возможность обнаружить поверхностные и подповерхностные дефекты в стальных изделиях на глубине до 5–10 мм;
- д) возможность применения 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;
- е) полностью автоматизированное проведение контроля.

К недостаткам феррозондового контроля относятся:

- 1) зависимость результатов контроля от величины намагниченности контролируемого объекта;

2) невозможность контроля деталей с малыми геометрическими размерами, соизмеримыми с размерами феррозондового преобразователя;

3) жёсткие технические требования к направлению и шагу сканирования детали феррозондовым преобразователем;

4) ложные срабатывания при наличии локальных градиентов магнитного поля вызванных:

- магнитными пятнами;
- приближением к краю;
- наличием выступов (буртов, рёбер);
- наклёпом;
- резким изменением сечения.

### **6.11.3 Магнитографический метод НК**

Метод неразрушающего контроля, основанный на регистрации и записи магнитных полей рассеяния с использованием в качестве индикатора ферромагнитной пленки, последующем считывании, и расшифровке этой записи [7, 8]. Здесь процесс контроля оказывается разделенным на два этапа, разнесенных во времени [53].

Для первого этапа магнитографического контроля необходимы устройство намагничивания и приспособления для крепления ленты на ОК, для второго – считывающие устройства – собственно магнитографические дефектоскопы.

О наличии дефекта можно судить, сравнивая магнитограмму на экране с соответствующими контрольными магнитограммами.

Для разделения дефектов по месту нахождения используется тот факт, что напряженность поля поверхностных дефектов убывает с удалением от поверхности детали быстрее, чем напряженность поля внутренних дефектов. Запись осуществляют дважды: сначала на ленту, плотно прилегающую к детали, а затем когда между лентой и деталью размещают неферромагнитную прокладку толщиной 0,5–1,0 мм. Во втором случае сигнал от внутренних дефектов изменяется значительно меньше, чем от поверхностных.

Для снижения порога чувствительности контроля необходимо добиваться наибольшей намагниченности «отпечатка» дефекта на магнитной ленте, оптимизируя режим намагничивания.

Для записи магнитных полей при магнитографическом контроле применяется магнитную ленту. Лента выполняется на триацетатной или лавсановой основе с нанесением на нее мельчайших ферромагнитных частиц. В настоящее время серийно выпускаются ленты типа МК-1 (на триацетатной основе) и МК-2 (на лавсановой основе) шириной 35 мм. Лента МК-2 обладает более высокими физико-механическими свойствами, чем лента МК-1, и может применяться при температурах окружающего воздуха от плюс 70 до минус 70 °С; лента МК-1 при температурах ниже минус 30 °С теряет эластичность.

Запись информации на магнитную ленту производится в полевых условиях по методикам, почти не требующим знаний в области дефектоскопии, а запись расшифровывает опытный дефектоскопист в лабораторных условиях.

Информацию на ленте можно сохранять в качестве документа и повторно расшифровывать. К недостаткам метода относится низкая производительность из-за необходимости укладки магнитной ленты на контролируемую поверхность.

Считывание результатов контроля с магнитной ленты производится магнитографическими дефектоскопами. Промышленностью выпускаются дефектоскопы, имеющие два вида индикации: импульсную и телевизионную (видеоиндикацию). При импульсной индикации на экране электронно-лучевой трубки возникают импульсы, амплитуда которых пропорциональна размеру дефекта в вертикальном направлении, а при видеоиндикации магнитный потенциальный рельеф полей рассеяния от дефектов переносится на экран монитора в виде телевизионного изображения магнитограммы отдельных участков шва.

Известны дефектоскопы типа МД-9 с импульсной индикацией и МД-11 с видимым изображением. Наиболее совершенные дефектоскопы МДУ-2У, МД-10ИМ и МГК-1 имеют двойную индикацию.

Чувствительность магнитографического контроля примерно такая же, как и магнитопорошкового. Она зависит от размеров, формы, глубины и ориентации дефектов, параметров считывающей головки дефектоскопа и типа магнитной ленты.

Магнитографический метод в основном применяют для контроля стыковых швов толщиной до 20 мм, выполненных сваркой плавлением, и в первую очередь при дефектоскопии швов магистральных трубопроводов.

Наиболее уверенно выявляются плоскостные дефекты (трещины, непровары, несплавления), а также протяженные дефекты в виде цепочек шлака, преимущественно ориентированные поперек направления магнитного потока. Значительно хуже выявляются округлые дефекты (поры, шлаковые включения). Практикой установлено, что этим методом уверенно обнаруживаются внутренние плоскостные дефекты, когда их вертикальный размер составляет 8–10 % толщины сварного шва.

На рисунке 6.45 изображено сварное соединение, подвергаемое намагничиванию с магнитной лентой, и сигналы МГ-дефектоскопа, соответствующие дефекту, кромке сварочного шва и краям ленты.

На поверхность намагниченной детали накладывается ферромагнитная лента, которая намагничивается тангенциальной составляющей магнитного поля дефекта. Затем лента протягивается в дефектоскопе, где информация считывается магнитными головками, представляющими собой феррозондовые датчики.

По величине и форме отклонения луча на экране монитора судят о величине и характере дефекта сварного соединения.

При магнитографии, как и при радиационном контроле, под чувствительностью метода  $\gamma$  подразумевают отношение вертикального размера минимального выявляемого дефекта  $\Delta a$  к толщине металла  $\delta$ :

$$\gamma = \left( \frac{\Delta a}{\delta} \right) \cdot 100 \% .$$

Чувствительность контроля зависит от глубины залегания дефекта. Чем глубже залегает дефект, тем при прочих равных условиях должна быть больше величина  $\Delta a$  и, следовательно, ниже чувствительность.

На чувствительность магнитографического метода сильно влияют высота и форма усиления шва, а также состояние его поверхности. При снятом усилении шва максимальная чувствительность контроля к указанным дефектам достигает 3–5 %, без снятого усиления – 8–15 %. Округлые внутренние дефекты обнаруживаются, когда их размер по высоте  $\geq 20$  % толщины шва.

Недостатком метода является двукратное преобразование информации и реакция только на тангенциальную составляющую поля рассеяния дефекта.

Качество получаемой информации во многом зависит от степени прилегания ленты к поверхности шва. Прижим должен быть плотным и равномерным. Магнитографический метод требует высокой квалификации оператора.

### Контрольные вопросы

- 1 Дать определение напряженности магнитного поля.
- 2 Дать определение магнитного потока.
- 3 Дать определение магнитной индукции.
- 4 Написать соотношение, связывающее магнитную индукцию с напряженностью магнитного поля.
- 5 Какой физический смысл имеет магнитная проницаемость (абсолютная и относительная).
- 6 Охарактеризовать параметры петли гистерезиса.
- 7 Какой вид имеют петли гистерезиса магнитотвердого и магнитомягкого ферромагнетика?
- 8 Перечислить первичные преобразователи магнитного поля.

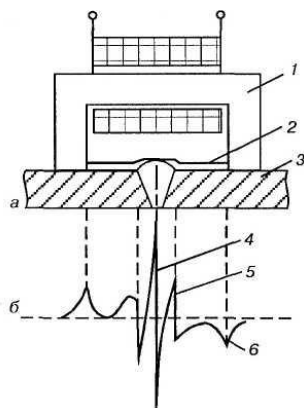


Рисунок 6.45 – Схема МГК (а) и изображение дефекта на экране МГ-дефектоскопа (б)  
 1 – намагничивающее устройство;  
 2 – магнитная лента; 3 – деталь с дефектом; 4–6 – импульсы от дефекта, края шва и края пленки соответственно

9 Показать поведение тангенциальной и нормальной составляющих напряжённости магнитного поля над трещиной.

10 Перечислить виды намагничивания, которые применяют при магнитном контроле.

11 Привести схемы полюсного намагничивания (показать расположение силовых линий магнитного поля).

12 Привести схемы циркулярного намагничивания (показать расположение силовых линий магнитного поля).

13 Привести схемы комбинированного намагничивания (показать силовые линии магнитного поля).

14 Описать способы размагничивания, перечислить их достоинства и недостатки.

15 Перечислить методы магнитного НК.

16 Какие условные уровни чувствительности установлены при МПК?

17 При какой шероховатости поверхности ОК достигаются уровни чувствительности А, Б, В?

18 Перечислить основные операции МПК.

19 В каких случаях при МПК рекомендуют применять СОН? Как определяют режим намагничивания?

20 В каких случаях при МПК рекомендуют применять СПП? Как определяют режим намагничивания?

21 Какие основные устройства применяют для МПК?

22 Как влияет ориентация дефектов в ОК на выбор способа и определение режима намагничивания?

23 Какие факторы осложняют проведение МПК и как они влияют на чувствительность контроля?

24 Как повысить эффективность контроля СПП деталей с большим размагничивающим фактором.

25 Какие дисперсионные среды применяют при МПК для приготовления магнитных суспензий.

26 Какие магнитные порошки и с какой целью применяют в дефектоскопии?

27 Описать физическую сущность феррозондового метода НК.

28 Какие технические средства входят в состав феррозондовой установки?

29 Раскрыть физическую сущность магнитографического метода НК.

30 Привести схему магнитографического метода НК.



# 7 ВИХРЕТОКОВЫЙ ВИД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

## 7.1 Физические основы вихретокового НК

### Вихревые токи и поверхностный эффект

**В**ихретоковый контроль (ВТК) основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в ОК этим полем [7, 8, 53].

Вихревые токи, на использовании которых основан рассматриваемый вид неразрушающего контроля, возникают в электропроводящих изделиях под воздействием переменного магнитного поля. Они были обнаружены французским ученым Д. Ф. Араго (1786–1853) в 1824 г. Он наблюдал, как медный диск, помещенный под вращающейся магнитной стрелкой, начинал вращаться. Это явление, названное *явлением Араго*, было объяснено М. Фарадеем с позиций открытого им закона *электромагнитной индукции*.

Согласно этому закону во всяком замкнутом проводящем контуре с числом витков  $w$  при изменении потока  $\Phi$  магнитной индукции  $B$  через площадь  $S$ , ограниченную этим контуром, возникает ЭДС индукции  $e = -w \frac{d\Phi}{dt}$ .

Последняя уменьшается при возрастании и увеличивается при уменьшении потока  $\Phi$  (правило Ленца). Правило Ленца имеет глубокий физический смысл – оно выражает закон сохранения энергии.

В общем случае в контур входит ферромагнитный сердечник с относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ , а напряженность  $H$  внешнего поля зависит от угла  $\alpha$  к нормали контура (рисунок 7.1).

Тогда  $\Phi = BS \cos \alpha = \mu_0 \mu H B \cos \alpha$ .

Направление нормали  $n$  и выбранное положительное направление обхода (направление силы тока  $I$ ) контура связаны правилом правого буравчика. В результате в контуре наводится ЭДС

$$e = -w \mu_0 \mu S \cos \alpha \frac{dH}{dt}. \quad (7.1)$$

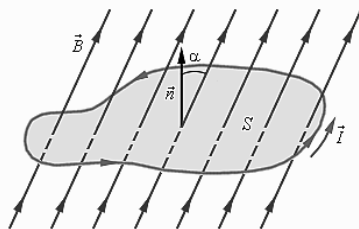


Рисунок 7.1 – Магнитный поток через замкнутый контур

Распределение и плотность вихревых токов определяются источником электромагнитного поля, геометрическими и электромагнитными параметрами ОК, а также взаимным расположением источника поля и ОК.

Вихревые токи подробно исследованы французским физиком Ж. Б. Фуко (1819–1868) и названы его именем (токи Фуко).

Вихревые токи имеют следующие свойства:

- возникают в электропроводящих телах вследствие изменения сцепленного с ними магнитного потока;
- замыкаются, образуя контуры, охватывающие силовые линии возбуждающего их магнитного потока;
- имеют максимальную плотность  $j = j_{\max}$  на поверхности металла, убывающую по мере удаления в глубь металла.

Изменение магнитного потока  $\Phi$  может происходить, например, под действием магнитного поля катушки индуктивности, питаемой переменным током, или при относительном перемещении проводящего тела и постоянного во времени магнитного потока, создаваемого, например, постоянным магнитом. В вихретоковом контроле, возбуждающий вихревые токи магнитный поток обычно создается катушками индуктивности, питаемыми синусоидальным током.

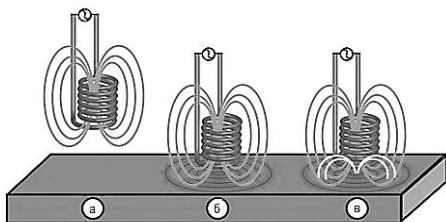


Рисунок 7.2 – Возбуждение вихревых токов в металле:

- a* – катушка индуктивности в воздухе;
- б* – вихревые токи создаются в металле;
- в* – вихревые токи создают вторичный магнитный поток

На рисунке 7.2 показаны силовые линии магнитного поля катушки, находящейся в воздухе (*a*), контуры вихревых токов, возникающие при ее электромагнитном взаимодействии с металлической пластиной (*б*), и силовые линии вторичного магнитного поля, создаваемые вихревыми токами (*в*). Вихревые токи, циркулирующие в однородном металле, имеют, как правило, контуры круговой формы и задаются только воз-

буждающим магнитным потоком. Однако при наличии в металле локальных неоднородностей (трещины, неэлектропроводящие включения, коррозионные поражения) контуры токов деформируются и распадаются на более мелкие, обтекая дефекты.

На рисунке 7.3 показаны контуры вихревых токов в электропроводящих дисках, расположенных в однородном переменном магнитном поле и имеющих в центральной части прорезь (*a*) и треугольный вырез (*б*).

Затухание (снижение плотности) вихревого тока по мере углубления в металл объясняется следующим. В соответствии с законом Ленца переменное магнитное поле вихревых токов стремится противодействовать изменению возбуждающего магнитного потока. Именно из-за этого в формуле (7.1) закона электромагнитной индукции имеется знак «минус».

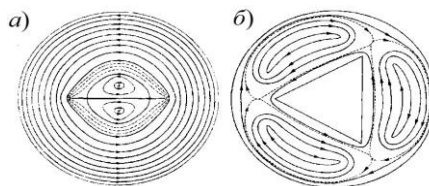


Рисунок 7.3 – Распределение вихревых токов в электропроводящих дисках, расположенных в переменном магнитном поле и имеющих неоднородность: *a* – прорезь; *б* – треугольный вырез

Следовательно, вихревые токи ослабляют создающий их магнитный поток. При этом степень ослабления растет по мере углубления в металл, т. к. в этот процесс включается все большее число контуров вихревого тока, находящихся выше. Это и приводит к т. н. *поверхностному эффекту*: наибольшую плотность  $j$  вихревые токи имеют на поверхности металла, находящегося под непосредственным воздействием источника магнитного поля.

Одновременно происходит уменьшение напряженности  $H$  магнитного поля в связи с ослаблением возбуждающего магнитного потока  $\Phi$  созданными им же вихревыми токами по мере перемещения в глубь металла. Данное явление называется *магнитным поверхностным эффектом*.

Следует отметить, что уменьшение магнитного потока, возбуждающего вихревые токи, связано не только с поверхностным эффектом, но и с удалением от его источника. Можно считать, что магнитное поле витка практически затухает на расстоянии диаметра от его плоскости. Таким образом, затухание вихревых токов в глубине металла происходит под действием сразу двух факторов: увеличения расстояния от возбуждающей катушки и поверхностного эффекта.

Если вихревой ток создается однородным магнитным полем напряженностью  $H_0$  (плоская волна), плотность тока не зависит от расстояния до источника и определяется только параметрами металлического объекта и частотой  $f$  изменения напряженности магнитного поля во времени.

Для пластины толщиной  $T \rightarrow \infty$  (полупространство) распределение плотности вихревого тока в металле, созданного плоской волной, определяется формулой

$$J(x) = J_0 [\exp(-ky)], \quad (7.2)$$

где  $y$  – координата, направленная от поверхности по нормали в глубь металла;  $k = \sqrt{-j\omega\mu_a\sigma}$ ,  $j = \sqrt{-1}$  – коэффициент распространения волны в металле,  $\mu_a = \mu_0\mu$  – абсолютная магнитная проницаемость металла;  $\mu_0$  – маг-

нитная постоянная;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость металла;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота изменения  $H$ ;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость металла.

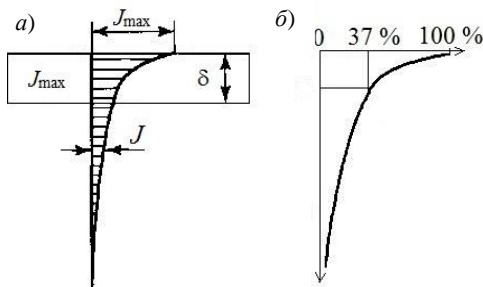


Рисунок 7.4 – Распределение плотности  $J$  вихревого тока, созданного плоской волной в сечении толстой пластины:

$a$  – общий случай;  $b$  – плоская волна

Для количественной оценки поверхностного (*skin*) эффекта<sup>1)</sup> используют показатель *глубина проникновения*  $\delta$ , физический смысл которого заключается в следующем: в слое глубиной  $\delta$  был бы сосредоточен весь ток, возбужденный в соответствующем сечении металла, если бы его плотность в этом слое равнялась максимальной плотности  $J_{\max}$  вихревого тока, создаваемой на поверхности (рисунок 7.4).

Глубина проникновения  $\delta$  вихревых токов для плоской волны равна глубине, на которой плотность вихревого тока уменьшается в  $e$  раз по сравнению с плотностью тока на поверхности металла со стороны источника переменного магнитного поля.

Из формулы (7.2) следует, что для источника в виде плоской волны глубина проникновения  $\delta = 1/k$ . Комплексная величина  $k$  имеет модуль

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu_a \sigma}, \quad \text{т. к. } \sqrt{-j} = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(j45). \text{ Следовательно,}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \sigma}}. \quad (7.3)$$

В выражениях (7.2) и (7.3) фигурирует произведение  $\omega \mu_a \sigma$ . В металлах с различными электромагнитными свойствами распределение электромагнитного поля и, в частности, глубина его проникновения будут одинаковы при равенстве произведений соответствующих параметров. Этого можно достигнуть путем изменения частоты  $\omega$ .

Распределение вихревых токов, созданных катушками ВТП, зависит не только от глубины их проникновения в металл, но и от расстояния до оси катушки и наличия в ней сердечника.

С увеличением расстояния от оси катушки плотность тока  $J_{\max}$  уменьшается, а глубина проникновения вихревых токов увеличивается. На этом основана технология ВТК с использованием «дальнего поля»: реакция вихревых токов

<sup>1)</sup> *Скин-эффект* (от *skin*, англ. – шкура) – вытеснение к поверхности детали из проводящего материала переменного магнитного поля и порождаемого им вихревого тока.

регистрируется в зоне, смещенной от участка с максимальной плотностью тока. При этом находят компромисс между глубиной проникновения вихревых токов и их плотностью. Это позволяет получить информацию об ОК с большей глубины, чем при традиционном подходе.

При ВТК о параметрах ОК судят по изменению электромагнитного поля вихревых токов, создаваемых взаимодействующим с ОК источником электромагнитного поля. Возбуждение вихревых токов и определение их реакции осуществляется вихретоковым преобразователем (ВТП), содержащим одну или несколько катушек индуктивности. Одна из этих катушек (возбуждающая) питается от источника переменного (синусоидального) тока и используется для создания переменного магнитного потока, возбуждающего вихревые токи.

## 7.2 Классификация вихретоковых преобразователей

В настоящее время для вихретокового контроля используется большое число типов и разновидностей ВТП (рисунок 7.5).

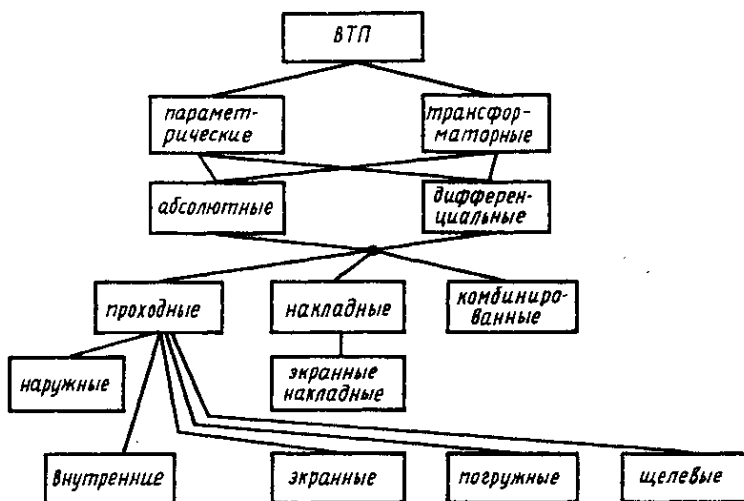


Рисунок 7.5 – Классификация ВТП

Вихретоковые преобразователи классифицируют по следующим признакам [54]:

1) по типу преобразования параметров ОК в выходной сигнал – параметрические и трансформаторные;

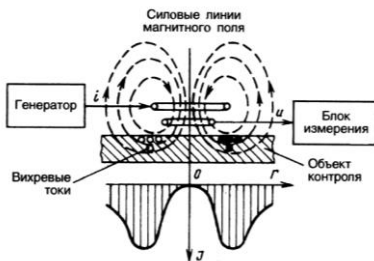
- 2) по способу соединения катушек (обмоток) (способу получения информации об ОК) – абсолютные и дифференциальные;
- 3) в зависимости от расположения по отношению к объекту контроля (по зоне взаимодействия с ОК) – проходные, накладные и комбинированные;
- 4) по числу элементов – одноэлементные и многоэлементные (матричные).

Рассмотрим особенности этих ВТП.

Реакция вихревых токов может определяться с помощью самих возбуждающих катушек по изменению их параметров (индуктивного и активного сопротивлений). Такие ВТП называют **параметрическими**. В простейшем случае ВТП может иметь только одну катушку индуктивности, используемую как для возбуждения вихревых токов, так и для измерения их воздействия.

Реакции вихревых токов могут определяться отдельными катушками индуктивности (измерительными) по наводимому в них магнитным потоком вихревых токов напряжению. ВТП, содержащие кроме возбуждающих и измерительные катушки индуктивности, называют **трансформаторными**. В трансформаторных ВТП, подобно трансформаторам с первичными и вторичными обмотками, имеются магнитосвязанные катушки – возбуждающие и измерительные. Возбуждающие и измерительные катушки могут быть соосными. Выходные характеристики таких ВТП подобны характеристикам параметрических ВТП с такими же размерами катушек.

Одно из основных преимуществ трансформаторных ВТП – возможность размещения возбуждающей и измерительной катушек в разных плоскостях и с разной ориентацией осей относительно друг друга. В этом случае можно получить другие характеристики ВТП – с большей чувствительностью, селективностью и т. п.



сундук 7.6 – Накладной трансформаторный ВТП над ОК

Ри-

Принцип действия классического трансформаторного накладного ВТП показан на рисунке 7.6. Возбуждающая катушка ВТП подключается к генератору переменного тока, а измерительная – к блоку измерения наводимого в нем напряжения. Указывая, что возбуждающая катушка питается от источника тока, считаем, что ток возбуждения остается неизменным при электромагнитном взаимодействии с ОК.

Гармоническое напряжение, характеризуемое комплексом  $\bar{U}$ , в измерительной обмотке наводится как магнитным потоком вихревых токов  $\bar{U}_{\text{вн}}$

(информативная составляющая), так и непосредственно возбуждающим магнитным потоком  $\bar{U}_0$  (неинформативная составляющая):  $\bar{U} = \bar{U}_0 + \bar{U}_{\text{вн}}$ .

При отсутствии металла  $\bar{U} = \bar{U}_0$ , поэтому оно называется «напряжением холостого хода». Для выделения информативной составляющей, определяемой только вихревыми токами, необходимо вычесть напряжение  $\underline{U}_0$  из напряжения  $\bar{U}$ . Для этого используется дополнительный компенсационный ВТП, идентичный первому (измерительному) и не взаимодействующий с ОК. Конструктивно измерительный и компенсационный ВТП объединяют в общем корпусе. Измерительные катушки ВТП включают дифференциально, добиваясь минимума амплитуды выходного напряжения  $\bar{U}$  при отсутствии ОК.

Амплитуда и фаза напряжения  $\bar{U}_{\text{вн}}$  определяются совместным действием вихревых токов, имеющих различные амплитуды и фазы, а фаза напряжения  $\bar{U}_0$  на  $90^\circ$  опережает фазу возбуждающего тока. Для накладных ВТП разность фаз  $\bar{U}_0$  и  $\bar{U}_{\text{вн}}$  монотонно растет с увеличением частоты со возбуждающего тока, достигая  $90^\circ$  в предельном случае. Амплитуда  $\bar{U}_{\text{вн}}$  при предельных значениях соответствующих параметров стремится к  $\bar{U}_0$ , но не может превысить ее. Практически  $\bar{U}_{\text{вн}}$  составляет 10–40 % от  $\bar{U}_0$ . Изменение параметров ОК, в частности наличие дефектов, приводит к изменениям  $\bar{U}_{\text{вн}}$  на 1–10 %. Таким образом, вихретоковый контроль связан с измерением слабых сигналов, сопоставимых с влиянием условий контроля и различных неконтролируемых параметров ОК. На результаты контроля с помощью накладных ВТП большое влияние оказывает изменение рабочего зазора  $h_0$  и отклонение оси катушек ВТП от нормали к поверхности ОК (угол  $\alpha$ ).

При взаимодействии с ферромагнитным ОК магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$  возбуждающей катушки частично замыкается через среду с относительной магнитной проницаемостью  $\mu \gg 1$ . Поэтому возбуждающий магнитный поток  $\Phi_{\text{в}}$ , с одной стороны, ослабляется циркулирующими в ферромагнитном металле вихревыми токами, но, с другой стороны, усиливается за счет уменьшения магнитного сопротивления ферромагнитной средой. Следовательно, вносимое вследствие электромагнитного взаимодействия с ферромагнитным металлом напряжение  $\bar{U}_{\text{вн}}$  будет иметь две компоненты:  $\bar{U}_{\text{вн}} = \bar{U}_{\text{м}} + \bar{U}_{\text{вт}}$ , где  $\bar{U}_{\text{м}}$  – магнитная компонента, усиливающая магнитный поток;  $\bar{U}_{\text{вт}}$  – ослабляющая вихретоковая компонента.

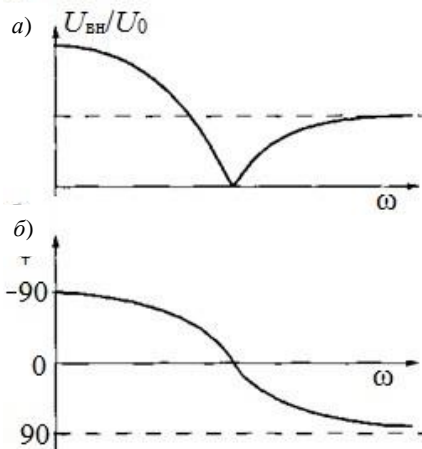


Рисунок 7.7 – Зависимость изменения амплитуды (а) и фазы (б) вносимого ферромагнитным объектом в накладной ВТП напряжения от частоты  $\omega$

Достигаемое при этом максимальное напряжение для накладного ВТП не может превышать удвоенного значения  $\bar{U}_0$ .

Предельное состояние соответствует уменьшению магнитного сопротивления в два раза при заполнении половины окружающего ВТП пространства ферромагнитным материалом с бесконечно большой магнитной проницаемостью. Так как сечение катушки ВТП конечно, а магнитная проницаемость ограничена, достигнуть предельного состояния невозможно.

В *параметрическом накладном* ВТП используется изменение магнитного потока вихревыми токами, взаимодействующими с возбуждающей катушкой, приводящее к изменению напряжения на ее зажимах (рисунок 7.8).

Очевидно, что для параметрического ВТП действуют те же законы, что и в трансформаторном при геометрическом совмещении возбуждающей и измерительной катушек. Получить такой ВТП можно при одновременной намотке двух проводов возбуждающей и измерительной катушек в общий паз.

Взаимодействие индуктивной катушки с ОК (рисунок 7.9) можно представить схемой воздушного трансформатора (рисунок 7.9, а), параметры цепи вторичной обмотки  $Z_{вт}$  которого определяются эквивалентным контуром вихревых токов в ОК.

С увеличением рабочей частоты амплитуда  $\bar{U}_{вт}$  возрастает, а фазовый сдвиг относительно  $\bar{U}_м$  изменяется от  $90^\circ$  до  $-90^\circ$ . При этом фаза  $\bar{U}_{вт}$  претерпевает изменение на  $180^\circ$ , а увеличение амплитуды напряжения  $\bar{U}$  на выходе измерительной катушки вследствие взаимодействия с ферромагнитным объектом сменяется его уменьшением (рисунок 7.7).

Максимальная величина напряжения на зажимах измерительной катушки создается при незначительной величине  $\bar{U}_{вт}$ , что имеет место при малых значениях частоты  $\omega$ .  $\varphi^\circ U_{вн}/U_0$



В схеме замещения воздушного трансформатора (рисунок 7.9, б)  $R_{вн}$  – вносимое в индуктивную катушку активное сопротивление, обусловленное потерями энергии за счет нагрева ОК вихревыми токами;  $L_{вн}$  – вносимая индуктивность, обусловленная изменением потокоосцепления<sup>1)</sup>  $\Psi = IL$  индуктивной катушки за счет действия вихревых токов. Поскольку потокоосцепление из-за действия вихревых токов изменяется, индуктивность катушки  $L$  при наличии вблизи нее электропроводящего ОК также изменится.

Параметры  $R_{вн}$  и  $L_{вн}$  зависят от плотности и распределения вихревых токов в ОК. Таким образом, определяя изменения активного и индуктивного сопротивления такого ВТП, можно судить о геометрических и электромагнитных параметрах ОК.

Изменение напряжения на зажимах катушки параметрического ВТП при неизменном токе в ней трактуют как изменение ее полного комплексного сопротивления  $\underline{Z}$  вследствие вносимого комплексного сопротивления:

$$\bar{Z}_{вн} = \bar{U}_{вн} / I = R_{вн} + jX_{вн}, \quad (7.4)$$

где  $R_{вн}$  и  $X_{вн}$  – активное и индуктивное сопротивления катушки ВТП.

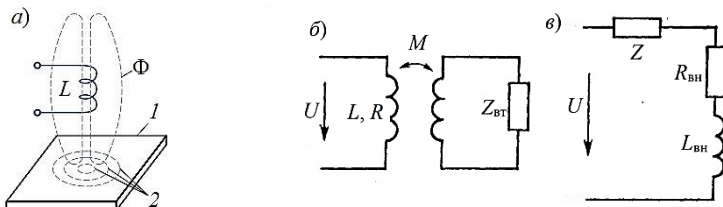


Рисунок 7.9 – Индуктив-

катушка над проводящим ОК (а), схема воздушного трансформатора, имитирующего ВТП (б) и его схема замещения (в): 1 – ОК; 2 – вихревые токи;  $L$  – катушка индуктивности;  $\Phi$  – магнитный поток

Аналогично напряжению холостого хода вводится понятие индуктивное сопротивление холостого хода  $X_0 = \omega L_0$ , где  $L_0$  – индуктивность катушки, не

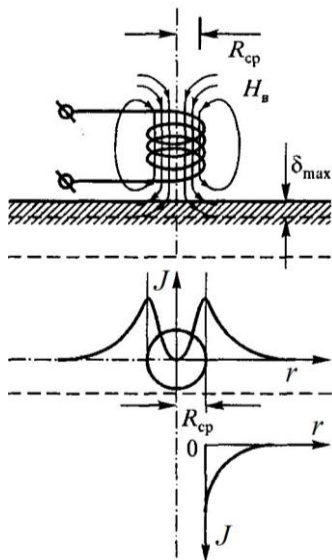


Рисунок 7.8 – Накладной параметрический ВТП над ОК

ная

<sup>1)</sup> *Потокоосцепление* (полный магнитный поток) – физическая величина, представляющая собой суммарный магнитный поток, сцепляющийся со всеми витками катушки индуктивности.

взаимодействующей с металлом.

Величина  $L_0$  однозначно определяется геометрическими параметрами катушки, в то время как активное сопротивление зависит еще и от материала провода катушки и его температуры.

Амплитуда выходного сигнала накладного ВТП, вносимого металлом, при увеличении рабочего зазора  $h_0$  между рабочим торцом ВТП и поверхностью ОК изменяется по экспоненциальному закону. Для ВТП с внешним диаметром 1–2 мм изменение  $h_0$  более, чем на 0,2 мм приводит к увеличению относительной погрешности в 2 раза, в результате чего появляются ложные сигналы при дефектоскопии. Поэтому необходимо стабилизировать  $h_0$  при сканировании ВТП поверхности ОК.

Достоинство параметрических ВТП заключается в их простоте – они могут состоять всего из одной катушки индуктивности. Недостаток – изменение активного сопротивления катушки ВТП от температуры, сопоставимо с его изменением под влиянием ОК, что весьма существенно для абсолютных измерений электрофизических и геометрических параметров ОК, но не имеет особого значения при выявлении дефектов. Различные варианты исполнения параметрических ВТП приведены в [54, 55].

Трансформаторные ВТП могут иметь как соосные, так и несоосные возбуждающие и измерительные катушки. Зависимость вносимого напряжения соосных трансформаторных ВТП подобна зависимости вносимого сопротивления соответствующих параметрических ВТП. Смещение осей измерительных и возбуждающих катушек трансформаторных ВТП, изменение формы и соотношения их размеров позволяет изменять зависимость вносимого напряжения от параметров ОК, добиваясь повышения эффективности контроля применительно к конкретным задачам. Таким образом, трансформаторные ВТП обладают большими возможностями ввиду изменения взаимного положения, формы и соотношения размеров возбуждающих и измерительных катушек.



Рисунок 7.10 – Абсолютный (а) и дифференциальный трансформаторный ВТП (б):  
1 – возбуждающие обмотки;  
2 – измерительные обмотки;  
3 – объект контроля

**Абсолютным** называют ВТП (рисунок 7.10, а), выходной сигнал которого определяется абсолютными значениями параметров ОК в зоне его электромагнитного взаимодействия с ВТП.

**Дифференциальным** ВТП принято называть, по существу, совокупность двух ВТП, обмотки которых соединены таким образом (рисунок 7.10, б), что выходной сигнал определяется разностью параметров ОК на соответствующих его участках

Абсолютные ВТП применяют для измерения электромагнитных параметров металла ОК, его геометрических размеров (толщины листов, труб, их внеш-

него и внутреннего диаметров, толщины покрытий и т. д.), выявления и оценки размеров дефектов. При взаимодействии с дефектом сигнал абсолютного ВТП зависит от размера дефекта (рисунок 7.11), а сигнал дифференциального ВТП пропорционален его изменению при переходе от одного до другого участка (рисунок 7.12).

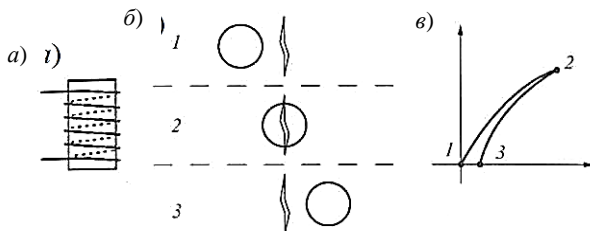


Рисунок 7.11 – Взаимодействие абсолютного ВТП с дефектом:  
*a* – ВТП; *б* – порядок сканирования участка с трещиной;  
*в* – отображение изменения вносимых параметров на комплексной плоскости

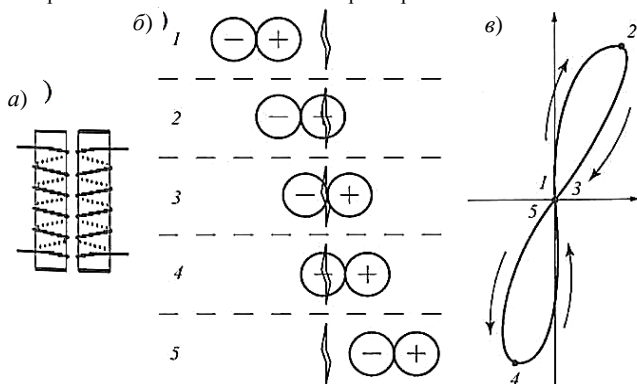


Рисунок 7.12 – Взаимодействие дифференциальных ВТП с дефектом:  
*a* – ВТП; *б* – порядок сканирования участка с трещиной;  
*в* – отображение изменения вносимых параметров на комплексной плоскости

Дифференциальные ВТП применяются преимущественно для дефектоскопии, в явном виде выделяя изменение вносимого сигнала при наличии дефекта. При этом влияние электромагнитной неоднородности металла и других факторов значительно ослабляется, т. к. они изменяются более плавно, чем сплошность металла. Однако можно пропустить дефект типа трещины с плавно изменяющейся глубиной при перемещении дифференциальных ВТП вдоль них. Поэтому дифференциальными накладными ВТП необходимо сканировать контролируемую поверхность в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

**Проходные ВТП** делят на наружные, внутренние, погружные и экранные, а **накладные** – на наружные и экранные.

Основной особенностью трансформаторных **проходных** наружных ВТП является то, что катушки таких ВТП охватывают ОК. Катушки проходных внутренних ВТП вводят внутрь ОК (рисунок 7.13).

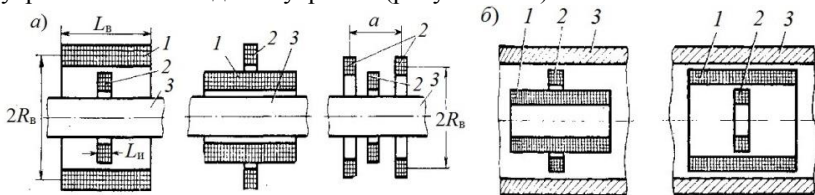


Рисунок 7.13 – Проходные наружные (а), внутренние (б) ВТП:  
1 – возбуждающая катушка, 2 – измерительная катушка, 3 – объект контроля.

Проходные ВТП могут иметь как одну, так и несколько измерительных катушек. Проходные ВТП с одной измерительной катушкой применяются для получения информации о геометрических параметрах ОК и их электрофизических свойствах, а с двумя дифференциально (последовательно-встречно) включенными измерительными катушками – для дефектоскопии.

Для проходных ВТП чаще применяют дифференциальный преобразователь с двумя идентичными дифференциально включенными измерительными катушками, размещенными с осевым зазором  $b$ , называемым базой дифференциального ВТП. Такой ВТП может быть, как трансформаторным, так и параметрическим.

*Внешние проходные ВТП* применяют в основном при производстве металлоизделий, встраивая системы контроля в технологический процесс. Сложность контроля наружными проходными ВТП линейно протяженных объектов, находящихся в эксплуатации, заключается в необходимости их охвата витками катушек, что, как правило, невозможно без демонтажа конструкции. Для оценки технического состояния находящихся в эксплуатации труб широко применяют внутренние проходные ВТП. Важная область их использования – дефектоскопия труб теплообменников из немагнитных металлов.

Из *наружных проходных ВТП* наибольшее распространение получили ВТП с однородным возбуждающим магнитным полем, создаваемым соленоидальной катушкой. Ввиду однородности возбуждающего магнитного поля, имеющего одинаковую напряженность  $H$  в рабочей зоне, подавляется влияние радиальных смещений ОК, которые связаны с наличием радиального зазора между каркасом катушек ВТП и ОК, необходимым для его свободного перемещения.

*Внутренние проходные ВТП*, как правило, имеют короткие возбуждающую и измерительную катушки. Это связано с необходимостью их перемещения в криволинейных участках труб.

Погружные ВТП используют для контроля жидких электропроводящих сред, их катушки помещают в контролируемую среду (рисунок 7.14).

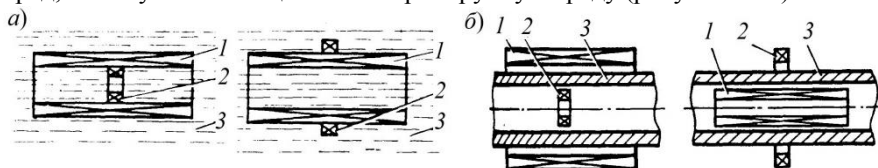


Рисунок 7.14 – Погружные (а) и экранные (б) ВТП

В *проходных экранных ВТП* возбуждающие и измерительные катушки располагают по разные стороны ОК.

Очевидно, что наружными, внутренними и погружными могут быть как параметрические, так и трансформаторные ВТП, а экранными – только трансформаторные.

К проходным могут быть отнесены и так называемые «щелевые» ВТП (рисунок 7.15) с магнитопроводом 4, охватывающим ОК.

**Накладные ВТП** (рисунок 7.16) располагают вблизи поверхности ОК, они имеют одну или несколько обмоток. Их оси обычно располагают нормально поверхности ОК, т. е. их прикладывают торцом к ОК. Однако возможно продольное расположение накладных ВТП, когда оси катушек направлены вдоль поверхности ОК (продольные накладные ВТП). Накладные ВТП обладают значительно большими возможностями для контроля, чем проходные. Они позволяют контролировать геометрические и электромагнитные параметры ОК сложной формы.

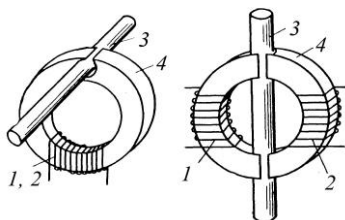


Рисунок 7.15 – Щелевые ВТП

Катушки накладных ВТП могут быть круглыми коаксиальными (см. рисунок 7.16, а), прямоугольными (рисунок 7.16, б), прямоугольными крестообразными (см. рисунок 7.16, в), с взаимно перпендикулярными осями (см. рисунок 15, г). Накладные ВТП, так же, как и проходные, могут быть экранными, когда возбуждающие и измерительные катушки располагаются по разные стороны ОК, например, контролируемого листа (см. рисунок 7.16, д).

Накладные ВТП выполняют с ферромагнитными сердечниками и без них. Благодаря ферромагнитному сердечнику (обычно ферритовому) повышается чувствительность (абсолютная) к изменению контролируемых параметров и формируется электромагнитное поле заданной топологии. На рисунке 7.16, е–и приведены разновидности накладных ВТП с ферромагнитными сердечниками. Сердечники используют для локализации магнитного поля с целью уменьшения зоны контроля.

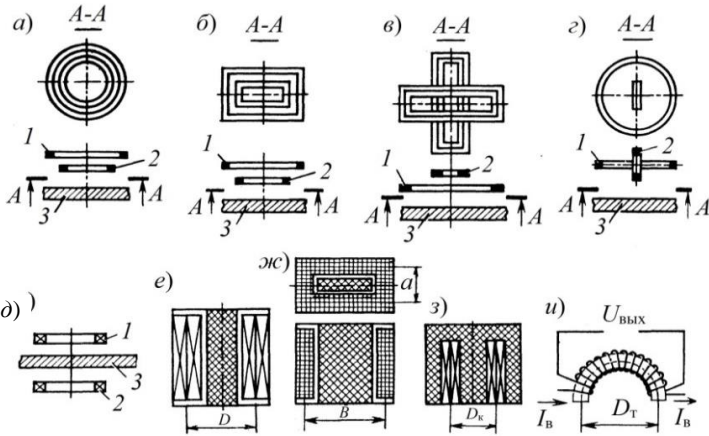


Рисунок 7.16 – Накладные ВТП с круглыми (а), прямоугольными (б), крестообразными (в) катушками, со взаимно перпендикулярными осями катушек (г), накладной экранной (д), накладные с ферромагнитными сердечниками (е-и)

В накладных ВТП локализация магнитного поля осуществляется благодаря тому, что в воздушный зазор магнитопровода 4 вставляется концентратор 5 в виде медной пластинки, в которой концентрируются вихревые токи, вытесняющие магнитное поле в зону контроля (рисунок 7.17, а). Также используются магнитопроводы специальной формы (рисунок 7.17, б, в), отверстия в неферромагнитном электропроводящем экране 4 (рисунок 7.17, г) или короткозамкнутый виток 5 на магнитопровode 4 (рисунок 7.17, д).

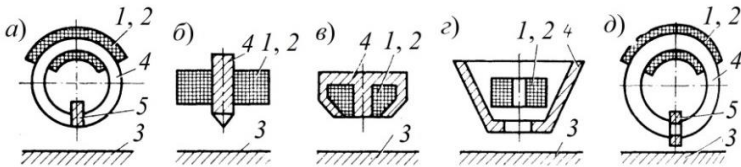


Рисунок 7.17 – Накладные локальные ВТП

Для накладных дифференциальных ВТП возможна схема с двумя дифференциально включенными идентичными абсолютными преобразователями, оси которых смещены на расстояние  $b$ , а рабочие торцы находятся в одной плоскости. На практике часто используют ВТП с одной возбуждающей катушкой, охватывающей две идентичные дифференциально включенные измерительные катушки. В накладных дифференциальных ВТП с одной измерительной катушкой создается возбуждающий магнитный поток, пересекающий плоскость витков измерительной катушки в разных направлениях [55].

В большинстве случаев накладные ВТП содержат ферромагнитные ферритовые сердечники, в которых концентрируется магнитное поле возбуждающей катушки, вследствие чего уменьшается пятно контроля. Кроме того, ввиду усиления магнитного поля ферромагнитным сердечником увеличивается абсолютная чувствительность ВТП. В простейшем случае ферромагнитный сердечник имеет форму цилиндра с плоскими торцами. Диаметр сердечника промышленно выпускаемых накладных ВТП составляет 1–6 мм.

Экранные накладные ВТП используют весьма редко. Поэтому под накладными ВТП, как правило, подразумевают наружные накладные ВТП, опуская определение «наружные».

**Комбинированные ВТП** представляют совокупность проходных возбуждающих и накладных измерительных катушек (рисунок 7.18).

**Многоэлементные (матричные) ВТП** состоят из нескольких элементов, представляющих собой идентичные одноэлементные ВТП, объединенные в общем корпусе (рисунок 7.19). Отличительной чертой вихретоковых матриц является количество задействованных катушек.

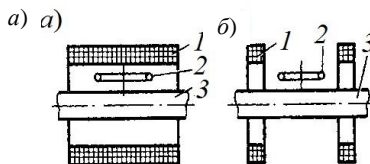


Рисунок 7.18 – Комбинированные ВТП с возбуждающей катушкой в виде соленоида (а) и с возбуждающими катушками в виде колец Гельмгольца<sup>1)</sup> (б)



Рисунок 7.19 – Многоэлементный (матричный) ВТП

Одна матрица может содержать до 256 катушек. Каждая из катушек это отдельный ВТП. При контроле с помощью матрицы захват площади существенно больше, чем при работе с одноэлементными ВТП.

Такие ВТП применяют при высокопроизводительном контроле ОК с большой поверхностью, например, трубопроводов, колесных пар железнодорожных составов, корпусного оборудования и т. п.

<sup>1)</sup> Кольца Гельмгольца представляют собой два одинаковых кольцевых витка, соединенных между собой последовательно и расположенных на расстоянии радиуса витка друг от друга.

ВТП **специальной конструкции** используют для контроля пространственного положения изделий, измерения параметров вибраций, скорости движения ОК, угловых и линейных смещений контролируемых изделий.

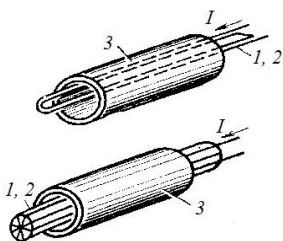


Рисунок 7.20 – Линейные ВТП

К специальным типам относятся ВТП в виде линейно протяженных витков или рамок, которые можно условно назвать *линейными* (рисунок 7.20).

Приведенная классификация ВТП далеко не полностью характеризует все многообразие ВТП, используемых для контроля различных параметров ОК и обнаружения и оценки различных дефектов.

### 7.3 Сигналы ВТП, годографы и способы ВТК

Сигнал ВТП – это ЭДС, напряжение, ток или сопротивление преобразователя, несущие информацию о параметрах ОК и обусловленные взаимодействием электромагнитного поля с ОК [53, 54].

Этот сигнал представляет собой комплексную величину, состоящую в случае параметрического ВТП из вносимого активного  $R_{вн}$  и индуктивного  $X_{вн} = \omega L_{вн}$  сопротивлений:  $Z_{вн} = R_{вн} + jX_{вн}$ , а в случае трансформаторного ВТП – из приращений активной  $Re$  и реактивной  $Im$  составляющих вносимого напряжения:

$$U_{вн} = ReU_{вн} + jImU_{вн}. \quad (7.5)$$

Зависимость сигнала ВТП от параметров объекта (свойства материала детали, ее формы, размеры дефекта, мешающие факторы) и от режима контроля отображают годографом – кривой на комплексной плоскости, прочерченной как бы концом вектора, описывающего изменение сопротивления катушки или напряжения на ней. Анализируя годографы, выбирают рабочую частоту, тип и схему ВТП, приемы контроля, обеспечивающие достаточную чувствительность дефектоскопа к выявленным дефектам и максимальную отстройку мешающих контролю факторов.

Годографы  $F(\beta)$  и  $F(\mu\sigma)$  описывают сигналы «классических» схем ВТП, которые имеют малую чувствительность к дефектам, требуют сложных схем обработки сигналов. На рисунке 7.21 показаны годографы влияния обобщенного параметра  $\beta = R_{cp} \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$  ( $R_{cp}$  – радиус среднего витка возбуждающей катушки), зазора  $h$ , приближений к краю и трещине ферромагнитной детали накладного ВТП, включенного в последовательной резонансный контур.



В каждой точке годографа  $F(\beta)$  для векторов выходных сигналов ВТП  $\underline{U}$  справедливо:

$$\bar{U} = \bar{U}_0 + \bar{U}_{\text{вн}}. \quad (7.6)$$

Частота возбуждения  $\omega = \omega_{\text{отт}}$  отвечает условию отстройки от зазора, т. е. амплитуда вектора  $\bar{U}$  практически остаётся неизменной при увеличении зазора  $h$ .

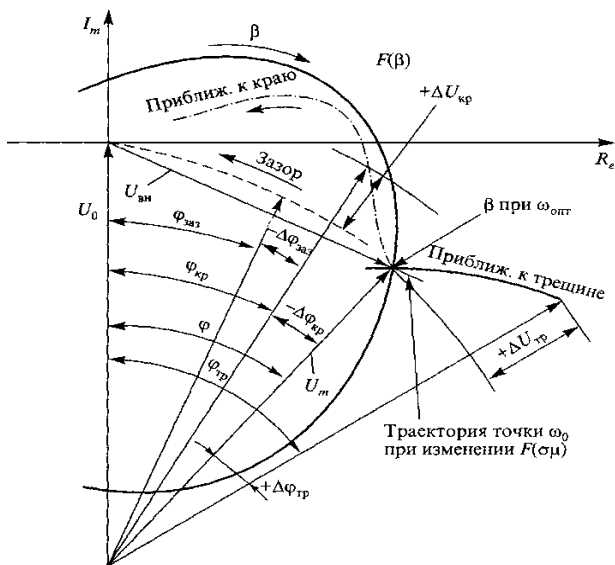


Рисунок 7.21 – Годографы влияния обобщенного параметра, зазора, приближений к краю и трещине в ОК, изменений электромагнитных свойств ОК

Влияние вариаций  $\gamma_c$  отражено годографом  $F(\sigma_c)$  при отклонении их величин от номинальных значений в пределах  $\pm 10\%$ . Видно, что отклонение амплитуды вектора  $U_m$  при этом не превышает  $0,1U_{m0}$ . Годограф приближения к «краю» детали показывает, что амплитуда вектора  $U_m$  имеет отклонения, достигающие  $0,2U_{m0}$ , и отрицательные приросты по фазе ( $-\Delta\phi_{\text{кр}}$ ). Годограф приближения к трещине свидетельствует о положительных отклонениях как амплитуды  $+\Delta U_{\text{тр}}$ , так и фазы  $+\Delta\phi_{\text{тр}}$ , причём уровни сигналов увеличиваются на порядок по сравнению с классическими схемами включения ВТП. Разнополярный характер изменения фазы при влиянии зазора и края по сравнению с влиянием на неё трещины позволяет решать задачу селекции сигнала трещины.

#### 7.4 Представление информации при ВТК

Вихревые токи, изменяющиеся во времени по гармоническому закону и циркулирующие в контурах различных форм и на разной глубине, различаются не только по амплитуде, но и по фазе. Особенно сильно изменяется фаза вихревых токов при изменении глубины их циркуляции. Суммарная реакция вихревых токов определяется совместным воздействием токов контуров разной амплитуды и фазы.

Поскольку сигнал ВТП имеет комплексный характер, то даже при контроле на одной частоте он имеет два параметра: амплитуду и фазу, или действительную и мнимую составляющие, или модуль и аргумент. Это позволяет реализовать двухпараметрический контроль, если влияние параметров объекта на параметры сигнала различно. Чаще используют один параметр сигнала. В любом случае в качестве носителя информации может быть использована либо амплитуда, либо фаза, либо одна из составляющих (действительная или мнимая) комплексного напряжения, либо их комбинация. Поэтому выделяют *амплитудный*, *фазовый* и *амплитудно-фазовый* способы получения сигнала ВТП.

*Амплитудный* способ вихретокового контроля достаточно эффективен, широко используется в различных областях техники. Этот способ реализуется обычно по следующей схеме. Сигнал с ВТП, возбуждаемый генератором, усиливают в усилителе и детектируют в амплитудном детекторе, с выхода которого напряжение огибающей подают на индикатор дефекта. На железнодорожном транспорте используется в дефектоскопах типа ВД-113.

Основной помехой при выявлении несплошности является зазор между ВТП и поверхностью. Задача отстройки от этой помехи лучше всего решается на основе *фазового* способа обработки сигнала, когда амплитудный детектор заменен на фазовый, имеющий кроме информационного входа опорный, подключенный через фазовращатель к выходу генератора. Фазовый способ реализован на железнодорожном транспорте в дефектоскопах серии ВД-НФ, где используется дифференциальный ВТП с тремя соосными обмотками на ферритовом сердечнике.

*Амплитудно-фазовый* способ выполняется по схеме включения ВТП в резонансный контур с формированием двух каналов одновременного измерения амплитуды и фазы напряжения, снимаемого с обмотки ВТП.

Представление информации при регистрации одного из параметров традиционно для измерительной техники. Например, для измерения удельной электрической проводимости  $\sigma$  пластины по фазе  $\varphi$  вносимого напряжения  $U_{вн}$  ВТП устанавливают в заданном месте, измеряемая величина  $\varphi$  отображается на индикаторе.

При дефектоскопии с регистрацией одного из параметров при сканировании контролируемой поверхности ВТП результаты-сигналы отображаются в виде графика (дефектограмма) на дисплее вихретокового прибора или подключенного компьютера (рисунок 7.22).

Для координатной привязки возможно применение одометра, конструктивно совмещенного с ВТП. Чаще всего для получения дефектограмм с меньшими искажениями сканирование проводят при фиксированной скорости перемещения.

Регистрация и отображение сразу двух информативных параметров позволяют существенно повысить эффективность отстройки от влияния мешающих параметров или идентификации сигналов, полученных от дефектов. На рисунке 7.23 показано, как отображение информации на комплексной плоскости позволяет разделять влияние вариации рабочего зазора ВТП (*lift-off*) и дефекта (коррозионного поражения).



Рисунок 7.22 – Отображение результатов сканирования при регистрации одного из параметров на дисплее прибора

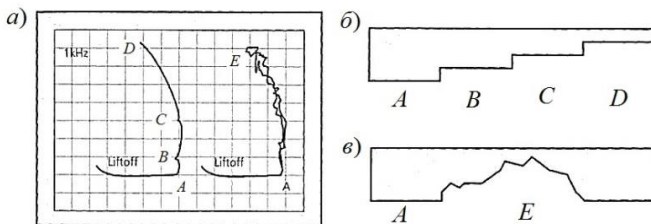


Рисунок 7.23 – Отображение информации на комплексной плоскости: а – дисплей прибора; б – настроечный образец; в – ОК с коррозионным поражением

## 7.5 Средства ВТК

В настоящее время вихретоковые приборы и установки широко используются в дефектоскопии, дефектометрии, толщинометрии, виброметрии, структуроскопии и для других целей. Средства ВТК включают в себя дефектоскопы, стандартные образцы, вспомогательные приборы, фиксирующие насадки.

*Дефектоскопы* предназначены для обнаружения и определения параметров дефектов – несплошностей материалов, различных трещин, расслоений, закатов, раковин, металлических включений и т. д.

Дефектоскопы – наиболее распространенный вид вихретоковых приборов НК. Они предназначены для обнаружения несплошностей в объектах из элек-

тропроводящих материалов. Условно их можно классифицировать по нескольким признакам.

*По виду объектов контроля* – для контроля объектов с плоскими поверхностями и объектов сложной формы; линейно протяженных объектов (пруток, проволока, трубы); мелких деталей массового производства (детали подшипников качения, крепежные детали и т. д.).

*По режиму работы* – для работы в *статическом* и *динамическом* режимах и универсальные.

Все задачи ВТК можно разделить на задачи *статического* и *динамического* (модуляционного) контроля.

*Статический контроль* происходит, когда в момент контроля ВТП и ОК неподвижны относительно друг друга (обычно это задачи, связанные с локальным измерением геометрических размеров или структурных элементов).

Если взаимно перемещать ВТП и ОК, то изменения свойств изделия, распределенные в пространстве, будут преобразованы во временные изменения выходного сигнала ВТП. Такой способ контроля называется *модуляционным* – он используется при контроле протяженных изделий: листов, проволоки, прутков, труб.

*По типу применяемых ВТП* – дефектоскопы с проходными и накладными ВТП; универсальные.

*По конструктивному исполнению* – стационарные, переносные и портативные.

В большинстве современных дефектоскопов с проходными ВТП информация выделяется *модуляционным* способом, поэтому они предназначены для *динамического режима* контроля, а для некоторых скорость движения объекта необходимо сохранять постоянной. Поскольку при изменении скорости изменяются частотный спектр сигналов и чувствительность дефектоскопа, некоторые дефектоскопы могут работать и в *статическом режиме* (при неподвижном объекте), однако этот режим не является основным и обычно используется при настройке прибора. Статический режим характерен для структуроскопов, которые можно применять и для дефектоскопии.

Технические характеристики дефектоскопов определяет ГОСТ 26697–85 [56]. Их можно разделить на *общие*, относящиеся к дефектоскопам как продукции приборостроения (масса, мощность потребления, показатели надежности, срок службы и т. д.), и *специальные* (порог чувствительности, разрешающая способность и максимальная производительность или скорость контроля).

Наряду с вышеперечисленными классификационными признаками возможны и другие признаки, например, *вид питания*, *защищенность от внешних воздействий*, хотя они относятся к признакам, общим для продукции приборостроения.

Важнейшей характеристикой дефектоскопа является *чувствительность*, которая определяется минимальными размерами достоверно выявляемого дефекта.

1 Основной параметр дефектоскопа – порог чувствительности. Это минимальные размеры дефекта заданной формы, при которых отношение сигнал/помеха  $\geq 2$ . В качестве стандартных дефектов часто принимают узкие разрезы, плоскость которых ориентирована нормально к поверхности образца, имеющие определенную глубину, длину и ширину, называемую также раскрытием. Такие искусственные дефекты наносят на плоские образцы, прутки и трубы различными методами. Другой тип стандартного дефекта – круглое сквозное или глухое отверстие заданных диаметра и глубины (для глухих отверстий). Отверстия как искусственные дефекты легче получаются, но сигналы от отверстий и искусственных трещин и риск той же глубины различны.

Реальный порог чувствительности дефектоскопа зависит, очевидно, как от уровня сигнала, так и от уровня помех. Наибольшее влияние оказывают помехи, связанные с изменением свойств ОК (например, магнитная проницаемость  $\mu$ , удельная электрическая проводимость  $\gamma$ ), размеров, шероховатости поверхности ОК, а также с изменением взаимного положения ВТП и ОК (изменения зазора при использовании накладных ВТП и радиальные перемещения ОК в проходном ВТП). Поэтому порог чувствительности не есть неизменный параметр, он зависит от конкретных условий применения дефектоскопа, что необходимо иметь в виду при его эксплуатации

Порог чувствительности, задаваемый в технической документации дефектоскопа, определяют, строго оговаривая эти условия. Указываются, например, материал и марка образца с аттестованным искусственным дефектом, взаимное расположение ВТП и образца, размеры образца, расположение искусственного дефекта. Так как сигнал зависит от положения ВТП относительно дефекта, то обычно при определении порога чувствительности имеют в виду наибольшее значение сигнала, получаемого при сканировании дефектного участка.

Современные вихретоковые дефектоскопы позволяют надежно обнаруживать поверхностные дефекты шириной 3–5 мкм, глубиной 0,1 мм и длиной 2 мм. Следует отметить, что эти параметры относятся к поверхности с малой шероховатостью ( $R_a \leq 1,25$  мкм). У деталей с большой шероховатостью минимальные размеры выявляемого дефекта возрастают. Порог чувствительности дефектоскопов с проходными ВТП обычно определяется глубиной узкого длинного продольного дефекта, выраженной в % от поперечного размера (диаметра) детали.

2 Разрешающая, способность – минимальное расстояние между двумя дефектами, при котором они регистрируются раздельно. Этот параметр обычно задается в пределах 5–15 мм. Для дефектоскопов с проходными

ВТП он зависит от диаметра ОК (и ВТП соответственно): чем больше диаметр, тем хуже разрешающая способность для дефектов, расположенных вдоль оси ОК. Для накладных ВТП разрешающая способность тем лучше, чем меньше зона чувствительности ВТП.

3 Другим нормируемым параметром дефектоскопа является максимально допустимое уменьшение выходного сигнала дефектоскопа с увеличением расстояния между торцом ВТП и поверхностью детали. Благодаря тому, что показания дефектоскопа уменьшаются всего на 10–15 % при зазоре между торцом и деталью  $\approx 1$  мм, прибор позволяет обнаруживать дефекты под краской на поверхности детали.

4 У дефектоскопов нормируется также минимальное расстояние между ВТП и краем детали, при котором изменение выходного сигнала преобразователя не превышает заданного значения (обычно  $\approx 10$  %). Это минимальное расстояние, как правило, составляет несколько миллиметров.

5 Максимальная производительность контроля – важная эксплуатационная характеристика, обычно задаваемая для дефектоскопов, работающих в автоматическом или полуавтоматическом режиме в технологических производственных линиях. При контроле линейно протяженных объектов производительность определяется скоростью контроля, м/с, а при контроле мелких объектов – числом объектов в единицу времени, шт./ч. Производительность контроля вихретоковых дефектоскопов ограничивается главным образом возможностями транспортирующих и сортирующих ОК устройств и устройств сканирования. Ограничения, связанные с влиянием скорости движения ОК в зоне контроля на сигналы ВТП, значительно менее жесткие и не определяют обычно производительности.

Кроме перечисленных указываются также качественные характеристики дефектоскопов: наличие автоматического подавления влияния изменений зазора; возможность оценки глубины (или протяженности) дефекта и документирования результатов контроля.

Установленные ГОСТ 26697–85 [56] общие технические требования обычно дополняются такими параметрами и характеристиками, как *частота тока возбуждения ВТП, условия применения дефектоскопа, виды и характеристики объектов контроля.*

Современные вихретоковые приборы и установки с микропроцессорами и микроЭВМ являются универсальными приборами и позволяют решать широкий круг задач НК из области дефектоскопии, толщинометрии и структуроскопии. Приборы и установки такого рода относятся обычно к многопараметровым, т. е. позволяют отдельно контролировать несколько параметров объекта, либо один параметр с подавлением влияния нескольких мешающих факторов. Это достигается одновременным либо последовательным контролем при нескольких частотах тока возбуждения ВТП, либо

использованием нескольких гармонических составляющих сигнала ВТП (при контроле ферромагнитных объектов).

В настоящее время в вагонном, пассажирском и локомотивном хозяйствах применяются следующие типы вихретоковых дефектоскопов [57, 58]:

- ВД-12НФМ и ВД-12НФ – для контроля поверхностных трещин в деталях с плоской и криволинейной поверхностями и шероховатостью  $R_z < 320$  мкм;

- ВД-13НФ – для выявления поверхностных трещин в цилиндрических роликах буксовых подшипников с возможностью автоматической разбраковки роликов;

- ВД-15НФ – для ручного контроля в режиме обнаружения дефектов и в режиме измерения глубины их залегания (от 2 до 9 мм);

- ВД-18НФ – для автоматического выявления поверхностных трещин в углах окон для роликов, а также на внутренней и наружной поверхностях дисков латунных сепараторов буксовых подшипников;

- ВД-113 и ВД-113.5 – для ручного контроля поверхностных трещин в деталях из ферромагнитных металлов и сплавов с радиусом кривизны более 100 мм; в отличие от ВД-113 в дефектоскопе ВД-113.5 имеется возможность запомнить не один, а четыре значения порога чувствительности и при переходе к контролю различных деталей кнопками переключать эти значения;

- ВД-211.7А – для автоматического контроля латунных сепараторов буксовых подшипников с выявлением поверхностных трещин и изменений геометрии: неперпендикулярность сторон окна и неплоскость торца сепаратора;

- ВД-211.5 – для автоматического контроля и выявления поверхностных трещин и разбраковки роликов подшипников качения № 2726 буксовых узлов;

- ВД-213.1 – для контроля при низких температурах на пунктах текущего ремонта вагонов.

Дефектоскопы ВД-12НФ, ВД-12НФМ, ВД-15НФ снабжены накладными трансформаторными дифференциальными преобразователями, сменными на диаметры 5 и 10 мм; ВД-113, ВД-113.5, ВД-213.1 – накладными роторными; ВД-211.5 – проходным внешним, ВД-211.7А – проходным внутренним; ВД-13НФ, ВД-18НФ – накладными трансформаторными.

В дефектоскопах ВД-213.1, ВД-113, ВД-113.5, ВД-12НФМ, ВД-15НФ, предназначенных для ручного контроля, установку порога чувствительности и проверку работоспособности осуществляют перед проведением контроля на СОП-НО-037 и СОП-НО-038 с искусственными дефектами. В вагонном хозяйстве на СОП-НО-037 данные операции производят только для ВТК цельнокатаных колес, для всех остальных деталей – на СОП-НО-038. Для дефектоскопов-автоматов настройка производится на СОП с искусственными дефектами, выполненными из образцов однотипных деталей.

Современные дефектоскопы ручного контроля типа ВД-113, ВД-113.5, ВД-213.1 превосходят по сервисным возможностям дефектоскопы ВД-12НФМ, ВД-12НФ, ВД-15НФ, однако уступают по эффективности дефектоскопирования из-за малой величины отклонения ВТП от нормали ( $5^\circ$  против  $30^\circ$ ) и малой предельной величины радиуса кривизны контролируемой поверхности (100 мм против 12 мм), малой механической прочности керами-ческого корпуса ВТП.

Следует учесть, что значимость дефектоскопов ВД-18НФ и ВД-211.7А, выявляющих дефекты латунных сепараторов, снижается из-за замены последних на пластмассовые. Низка производительность ручного ВТК имеющимися средствами цельнокатаных колес, деталей рам тележек и ударно-тягового оборудования.

## **7.6 Области применения ВТК**

В настоящее время вихретоковые приборы и установки широко используются для обнаружения и определения параметров дефектов – несплошностей материала (дефектоскопия и дефектометрия), контроля размеров ОК и параметров вибраций (толщинометрия и виброметрия), определения физико-механических параметров и структурного состояния материалов (структуро-скопия), обнаружения электропроводящих объектов (металлоискатели) и др.

Так как вихревые токи возникают только в электропроводящих материалах, то объектами вихретокового контроля могут быть изделия, изготовленные из металлов, их сплавов, графита, полупроводников и других электропроводящих материалов: трубы, листы, пластины, в том числе многослойные, железнодорожные рельсы, корпусные элементы, шарики и ролики подшипников, крепежные детали, электропроводящие прутки, проволока и многое другое.

Объекты ВТК в вагонном хозяйстве указаны в РД 32.174–2001 [57]: цельнокатаные колеса, элементы тележек различных моделей и буксовых подшипников, ударно-тяговое оборудование. Общие требования к средствам и методикам проведения ВТК деталей при всех видах планового ремонта вагонов приведены в РД 32.150–2000 [58].

Вносимые параметры ВТП, ЭДС или сопротивление зависят от многих параметров ОК, наличия поверхностных дефектов, изменения удельной электрической проводимости  $\gamma(\sigma)$  и магнитной проницаемости  $\mu$ , а также от взаимного расположения ВТП и ОК (зазор, близость к «краю», наклоны ВТП и т. п.). Это определяет как достоинства, так и трудности реализации ВТК.

С одной стороны, возможен многопараметровый контроль, при котором измеряется одновременно несколько параметров, например, толщина и удельная электрическая проводимость листа. С другой стороны, приходится использовать различные сложные способы выделения сигналов от контро-



лируемых параметров и подавления влияния мешающих контролю факторов для того, чтобы осуществлять селективный (раздельный) контроль параметров.

Вихретоковый контроль – бесконтактный, т. к. между катушкой и ОК всегда имеется зазор, достаточный для ее свободного перемещения. Это способствует достижению высоких скоростей сканирования и, следовательно, высокой производительности контроля. Достоинством ВТК является возможность автоматизации, что предусмотрено электрической природой сигнала ВТП.

Отличительной особенностью ВТК является возможность портативного исполнения приборов контроля за счет использования средств микроэлектроники.

Достоинством ВТК является и то, что на сигналы ВТП практически не влияют состояние окружающей среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности ОК непроводящими веществами, а также простота конструкции ВТП. Как правило, катушки ВТП помещают в предохранительный корпус, они устойчивы к механическим и атмосферным воздействиям.

### **Контрольные вопросы**

1 Физические основы вихретокового НК (закон электромагнитной индукции, схемы замещения, особенности и области применения).

2 Классификация вихретоковых преобразователей по типу преобразования параметров (общая схема классификации, определение и примеры).

3 Классификация вихретоковых преобразователей по способу соединения катушек (общая схема классификации, определение и примеры).

4 Классификация вихретоковых преобразователей по положению относительно ОК (общая схема классификации, определение и примеры).

5 Сигналы вихретокового преобразователя, годограф, способы вихретокового НК.

6 Средства вихретокового НК: дефектоскопы, их классификация, характеристики.

## 8 НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ПРОНИКАЮЩИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

---

Контроль проникающими веществами – вид НК, основанный на проникновении веществ в полости дефектов контролируемого объекта<sup>1)</sup> [7, 8, 59–63]. Его разделяют на две подгруппы: *капиллярные методы* контроля (КМК) и *методы течеискания* (МТ).

### 8.1 Капиллярные методы контроля

На железнодорожном транспорте КМК впервые был использован в виде т. н. керосиново-меловой пробы, которую помнят старые специалисты-железнодорожники. Этот самый старый и простой метод десятки лет обеспечивал безопасность всего подвижного состава СССР, надежно контролируя самое опасное место локомотивов и вагонов – шейки колёсных пар, выявляя дефекты 10–20 мкм (при выдержке до 20 ч выявляются трещины 1–3 мкм). Со временем номенклатура деталей расширялась, т. к. всё больше деталей изготавливалось из цветных и немагнитных материалов; клапаны тепловозных двигателей из аустенитной стали, латунные элементы подшипников и др.

Расцвет капиллярного контроля пришелся на 40-е гг. двадцатого столетия, когда в технике нашли широкое применение немагнитные материалы (алюминий, дюраль, титан и т. п.) и шел поиск новых методов их контроля. Проблему решили цветной и люминесцентный КМК.

*Историческим фактом является то, что авторы первого патента на люминесцентный метод контроля братья Боб и Джо Свитцеры (США) случайно наткнулись на идею метода. Экспериментируя с люминофорами для использования в рекламе и криминалистике, они обнаружили, что как бы тщательно они ни мыли руки, поры (трещины) кожи рук всегда светились. Это навело их на мысль добавить люминофор в жидкость и использовать ее в качестве индикаторной, что дало блестящие результаты.*

Капиллярные методы контроля основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей-пенетрантов (от англ. *penetrante* – проникать) в полости поверхностных и сквозных дефектов (не сплошности материала) объектов контроля и регистрации (визуально, с помощью приборов) обра-

---

<sup>1)</sup> При выявлении невидимых или слабо видимых глазом поверхностных дефектов термин «проникающими веществами» может изменяться на «капиллярный», а при выявлении сквозных дефектов – на «течеискание».

зующихся следов дефектов, которые создает извлеченная из полостей дефектов индикаторная жидкость на контролируемой поверхности.

**Индикаторным пенетрантом** называют дефектоскопическую жидкость, обладающую способностью проникать в несплошности объекта контроля и образовывать при ее последующем полном или частичном извлечении слоем проявителя визуализируемый индикаторный рисунок дефекта.

**Проявителем** называют дефектоскопический материал, предназначенный для извлечения индикаторного пенетранта из капиллярной несплошности с целью образования четкого индикаторного рисунка в месте выхода трещины на поверхность и создания контрастирующего с ним фона.

**След дефекта, индикаторный рисунок** – изображение, образованное индикаторной жидкостью (пенетрантом) в месте расположения несплошности и подобное форме трещины у выхода на поверхность объекта контроля. Применительно к несплошности типа единичной трещины применяют термин «индикаторный след».

Капилляр, выходящий на поверхность объекта контроля только с одной стороны – *поверхностная несплошность*, капилляр, соединяющий противоположные стенки объекта контроля – *сквозная несплошность*.

Все капиллярные методы контроля по характеру взаимодействия проникающих пенетрантов с объектом контроля относятся к молекулярным.

### 8.1.1 Геометрические характеристики поверхностных дефектов

Основным объектом поиска при капиллярном контроле является дефект (трещина), имеющая выход на поверхность, т. н. *поверхностная трещина (несплошность)*. Различают тупиковые и сквозные дефекты (трещины). На рисунке 8.1, *а* слева тупиковая трещина имеет только один выход на поверхность. Сквозной дефект на рисунке 8.1, *а* справа имеет два выхода на поверхность.

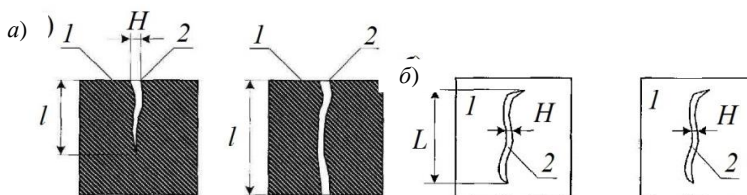


Рисунок 8.1 – Геометрическая характеристика трещины:

1 – поверхность ОК; 2 – трещина; а – вид сбоку; б – вид сверху

Трещину характеризует *глубина l* – размер несплошности в направлении внутрь объекта контроля от его поверхности. Для сквозных трещин он определяется толщиной стенки между двумя поверхностями изделия (см. рисунок 8.1, *а*).

Продольный размер несплошности вдоль поверхности контроля называют *длиной дефекта*  $L$ , при этом для сложных дефектов имеют в виду «преимущественный размер», т. е. наибольший из двух на поверхности изделия (см. рисунок 8.1, б).

*Раскрытие несплошности*  $H$  – это поперечный размер дефекта у его выхода на поверхность объекта (см. рисунок 8.1, а).

Поскольку дефекты бывают сложной формы, различают максимальную, минимальную и среднюю глубину  $l$ , длину  $L$  и раскрытие несплошности (ширина трещины)  $H$ .

Условно капиллярные дефекты подразделяют на следующие виды: *поры*, имеющие сечение близкое к круглому (рисунок 8.2, I, II); *трещины с параллельными стенками* в виде щели, типа прорези (рисунок 8.2, III); *трещины с непараллельными стенками*, конического сечения (рисунок 8.2, IV). В основном же трещины имеют произвольную геометрию (рисунок 8.2, V).

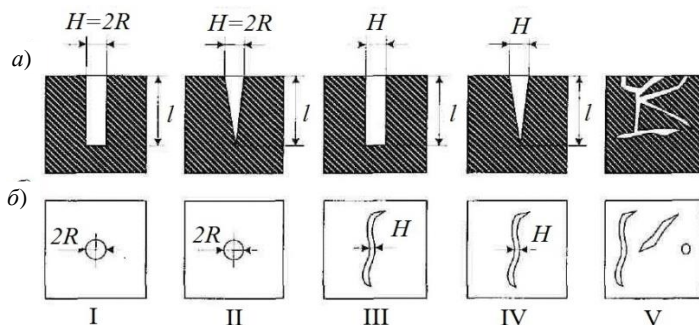


Рисунок 8.2 – Основные моделируемые при теоретических расчетах виды поверхностных тупиковых трещин:

*a* – вид сбоку; *б* – вид сверху; I – цилиндрическая пора; II – коническая пора, III – трещина с параллельными стенками; IV – трещина с непараллельными стенками, V – трещина произвольной симметрии

Совершенно идеальных круглых или прямоугольных дефектов нет, на рисунках 8.1 и 8.2 представлены идеализированные модели трещин. На практике дефекты далеки от идеала и наиболее часто представляют собой объединение близких к цилиндрическим, овальным и другим моделируемым капиллярным несплошностям, сообщающихся и не сообщающихся между собой.

Инженер-конструктор и инженер-дефектоскопист, располагая сведениями обо всех видах дефектов и видах НК для каждой детали и характерных для нее типов дефектов, могут подобрать вид НК в зависимости от материала изделия, расположения дефекта, наличия к нему доступа и других обстоятельств.

Дефекты, наиболее эффективно выявляемые капиллярным методом – это термические, шлифовочные и рихтовочные трещины, возникающие при механической обработке; пористость при литье; заковы при обработке давлением; усталостные трещины и дефекты по границам зерен от длительной эксплуатации: трещины ползучести, коррозии под напряжением, водородной хрупкости и т. д.

### 8.1.2 Последовательность операций при капиллярном контроле

Капиллярный контроль представляет собой многооперационный процесс, который включает в себя подготовку изделия к контролю, нанесение индикаторной жидкости, удаление ее излишков, нанесение проявителя и проявление.

Основные операции капиллярного контроля представлены на рисунке 8.3, где схематически изображена деталь 1 с дефектом 2, имеющим выход на поверхность П.

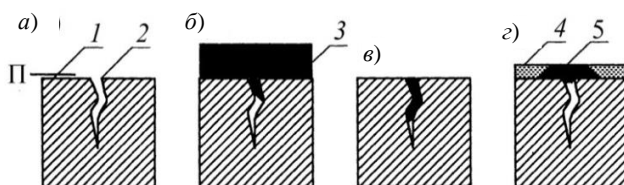


Рисунок 8.3 – Последовательность операций при капиллярной дефектоскопии:  
*а* – дефект в изделии; *б* – нанесение пенетранта; *в* – удаление пенетранта с поверхности;  
*г* – нанесение проявителя и проявление; 1 – изделие; 2 – дефект; 3 – пенетрант;  
 4 – проявитель; 5 – след дефекта (окрашенный проявитель)

Во время каждой из этих операций поверхность трещины вступает в контакт с несколькими дефектоскопическими материалами, в основном с жидкостями. Поэтому явление смачивания поверхности детали различными жидкими дефектоскопическими материалами играет первостепенную роль. Только благодаря смачиванию возможен контакт между дефектом и дефектоскопическими материалами и реализация капиллярного контроля.

Эффективность каждой операции зависит от нескольких физических явлений, определяемых физико-химическими свойствами контактирующих сред и материала объекта.

Сложность выбора свойств дефектоскопических материалов состоит в том, что в разных операциях одна и та же жидкость должна обладать даже противоположными свойствами. Так, при заполнении трещины индикаторная жидкость должна обладать наилучшей проникающей способностью, чтобы как можно лучше заполнить полость дефекта. Но парадокс состоит в

том, что такую жидкость затем трудно извлечь из трещины при проявлении. В результате такой пенетрант останется в трещине и не образует следа на поверхности, т. е. трещина таким пенетрантом не будет обнаружена.

Кроме взаимодействия жидких дефектоскопических материалов с твердыми поверхностями следует также принимать во внимание взаимодействие жидкостей между собой, а также с газами. Явления растворения и диффузии существенно влияют на конечный результат контроля, прежде всего на его чувствительность. Использование при капиллярном контроле внешних физических полей (акустического, магнитного, электромагнитного и др.) требует учета явлений, которые возникают при их взаимодействии с жидкими и твердыми дефектоскопическими материалами.

Поэтому знание физических явлений, лежащих в основе операций капиллярного контроля, не только позволяет понять суть происходящих процессов, но и дает возможность грамотно ими управлять с целью повышения чувствительности и производительности, а также открывает пути совершенствования существующих и создания новых технологий контроля.

### **8.1.3 Физические явления, лежащие в основе капиллярного контроля**

#### ***1 Смачивание и поверхностное натяжение***

**Смачивание** – проявление взаимодействия молекул на трехфазной границе: твердой, жидкой и газообразной (или второй жидкой) фаз, выражающееся в растекании жидкости по поверхности твердого тела.

Смачивание определяется взаимным притяжением молекул жидкости, твердого тела и газа. Молекулы, находящиеся во внутренних слоях жидкости или воздуха, испытывают в среднем одинаковое по всем направлениям притяжение со стороны окружающих молекул; молекулы же поверхностного слоя подвергаются неодинаковому притяжению со стороны внутренних слоев вещества и с его стороны, граничащей с поверхностным слоем. Например, на поверхности раздела «жидкость – воздух» молекулы жидкости, находящиеся в поверхностном слое, сильнее притягиваются со стороны соседних молекул внутренних слоев жидкости, чем со стороны молекул воздуха, т. к. межмолекулярные расстояния в жидкости намного меньше, чем в газе. Поэтому равнодействующая межмолекулярных сил в поверхностном слое не равна нулю и направлена внутрь фазы с где силы взаимодействия между молекулами больше. Возникающие при этом силы, называемые *силами поверхностного натяжения*, стремятся уменьшить поверхность жидкости до минимальной при данных условиях.

В практике капиллярного контроля *поверхностным натяжением* обычно называют силы, действующие на границе раздела «пенетрант – воздух».

**Коэффициент (сила) поверхностного натяжения  $\sigma$**  численно равен силе, действующей на единицу длины границы раздела «жидкость – газ» и обуславливающей сокращение поверхности жидкости. Направление этой силы – по касательной к границе раздела и перпендикулярно периметру.

Еще одно определение коэффициента поверхностного натяжения связано с работой  $\Delta A$ , которую необходимо затратить для изотермического образования поверхности  $\Delta S$  границы раздела «жидкость – газ». Количественно это определение характеризуется соотношением  $\sigma = \Delta A / \Delta S$ . Эту величину часто называют *удельной свободной поверхностной энергией*, численно равной поверхностному натяжению. Очевидно, что в рамках первого из приведенных выше определений, коэффициент поверхностного натяжения измеряется в Н/м, а в рамках второго – в Дж/м<sup>2</sup>.

Все жидкости по отношению к твердым телам разделяют на *смачивающие* и *несмачивающие*.

*Например, вода – смачивающая жидкость по отношению к стеклу, но несмачивающая по отношению к парафину.*

**Смачивание контролируемой детали дефектоскопическими материалами – главное условие капиллярного контроля.**

Смачивание представляет собой результат действия сил поверхностного натяжения.

В качестве индикаторных пенетрантов обычно применяют жидкости с относительно низким поверхностным натяжением  $\sigma = (2,5...3,5) \cdot 10^{-2}$  Н/м (таблица 8.1). Величина  $\sigma$  уменьшается с ростом температуры пенетранта.

**Таблица 8.1 – Коэффициенты поверхностного натяжения для некоторых жидкостей при НУ**

Жидкость	Поверхностное натяжение $\sigma$ , $10^{-2}$ Н/м	Жидкость	Поверхностное натяжение $\sigma$ , $10^{-2}$ Н/м
Вода	7,28	Ксилол	2,90
Ацетон	2,37	Этиловый спирт	2,28
Пентан	1,50	Бутиловый спирт	2,46
Толуол	2,85	Бензин	2,89
Бензол	2,90	Пенетранты типа ЛЖ	2,63–3,43

## **2 Адгезия и когезия**

Физическая сущность смачивания особенно хорошо определяется с помощью понятий адгезии и когезии, имеющих четкий физический смысл.

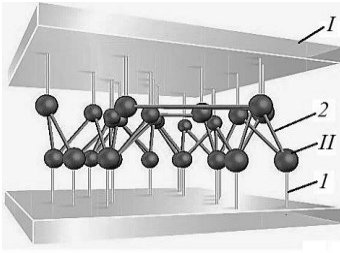


Рисунок 8.4 – Силы межмолекулярного взаимодействия:  
 I – фаза 1; II – фаза 2;  
 1 – адгезия, 2 – когезия

**Адгезия** – это энергия молекулярной связи между поверхностями двух соприкасающихся фаз. Количественно ее определяют работой, затрачиваемой на разделение тел в расчете на единицу площади (рисунок 8.4).

Сцепление между молекулами (атомами, ионами) в объеме тела называется **когезией**. Соответственно силы, действующие между молекулами, находящимися в разных фазах, называют *силами адгезии*, а внутри фазы – *силами когезии*.

### 3 Капиллярность

Капиллярные явления наблюдаются в тонких трубках – капиллярах. Если опустить капилляр в сосуд с жидкостью, то в капилляре жидкость поднимается гораздо выше уровня жидкости в сосуде. Высота капиллярного подъема  $h$  вычисляется по формуле

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g R}, \quad (8.1)$$

где  $R$  – радиус капилляра;  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение силы тяжести.

Капиллярный подъем  $h$  тем больше, чем больше сила смачивания  $\sigma \cos \theta$ , и чем меньше радиус капилляра, т. е. чем тоньше капиллярная трещина, тем глубже будет проникать в нее дефектоскопическая жидкость.

Капиллярами условно можно считать трубки диаметром  $< 3,0$  мм и, соответственно, дефекты (трещины, поры и др.) с таким же раскрытием можно считать тоже капиллярными.

Известно, что при контакте жидкости с твердой плоской поверхностью или стенками капилляра граница раздела «жидкость – твердая стенка – газ» всегда искривляется. В капиллярных трубках жидкость (точнее, граница газа и жидкости) изгибается с кривизной радиусом  $r$ , образуя поверхность, которую называют **мениском**. В капилляре в случае смачивания мениск вогнутый, в случае несмачивания он выпуклый. Силы смачивания приложены к линии соприкосновения жидкости и стенок капилляра. Их можно рассматривать также как силу натяжения поверхности мениска, образуемого жидкостью в капилляре.

Эта поверхность представляет собой растянутую куполообразную пленку, стремящуюся сократиться. Отсюда вводится понятие **капиллярного давления**, равного отношению действующей на мениск силы к площади поперечного сечения трубки и определяемого по формуле Лапласа:



$$P_k = \frac{2\sigma\cos\theta}{R} = \frac{2\sigma\cos^2\theta}{r}. \quad (8.2)$$

Капиллярное давление в щели с плоскими параллельными стенками, расположенными на расстоянии  $H$  друг от друга, рассчитывается по аналогичной формуле:

$$P_k = \frac{2\sigma\cos\theta}{H}. \quad (8.3)$$

*Капиллярное давление* – это разность давлений по обе стороны искривленной поверхности раздела фаз, находящихся в капилляре, вызванная поверхностным (межфазным) натяжением.

Капиллярное давление, как и высота подъёма, увеличивается с увеличением смачиваемости и уменьшением радиуса капилляра. В трубках с меньшим диаметром жидкость поднимается на большую высоту, чем в трубках с большим диаметром, т. к. при этом капиллярное давление больше.

Следует еще раз подчеркнуть, что смачивание является неременным условием проявления капиллярности и, следовательно, необходимым условием реализации капиллярного неразрушающего контроля.

#### **4 Растворение**

Механизм растворения объясняется тепловым движением молекул. В результате растворения молекулы вещества равномерно распределяются по объему растворителя. В капиллярной дефектоскопии большинство дефектоскопических материалов жидкие. Поэтому в дальнейшем речь будет идти о растворении жидкостей, твердых тел и газовых смесей в жидкостях.

В капиллярной дефектоскопии растворение играет важную роль при подготовке изделий к контролю (растворение и удаление загрязнений), удалении излишков пенетранта с поверхности изделия и окончательной очистке изделия от проявителя, особенно если для этого используются органические растворители. Кроме того, растворение газа (обычно воздуха) в индикаторной жидкости может значительно увеличить скорость и предельную глубину заполнения дефектов пенетрантом.

Существуют жидкости, пары которых почти нерастворимы друг в друге (вода – ртуть, вода – керосин и др.), компоненты ряда жидких систем обладают ограниченной растворимостью (вода – фенол, метиловый спирт – гексан, вода – анилин), а во многих случаях имеет место полная взаимная растворимость компонентов друг в друге. Рассмотрим некоторые основные закономерности растворения.

Растворимость газов в жидкостях зависит от вида газа и растворителя, температуры и давления.

1 При постоянной температуре влияние давления (исключая область высоких давлений) достаточно хорошо описывается *законом Генри*, в соответ-

ствии с которым растворимость  $c$  данного газа в данном растворителе прямо пропорциональна давлению  $p$  этого газа над раствором:

$$c = k_r p, \quad (8.4)$$

где  $c$  – концентрация (молярная доля);  $k_r$  – постоянная растворимости Генри для данной пары газ–жидкость при заданной температуре, моль/(л·атм);  $p$  – давление газа над раствором.

2 При растворении смеси газов растворимость каждого из них определяется его парциальным давлением.

3 Растворение газов в жидкости – процесс экзотермический (идет с выделением тепла). Поэтому в соответствии с *принципом Ле-Шателье* повышение температуры уменьшает растворимость газов. Наличие в жидкости других растворенных веществ также уменьшает растворимость газа.

Для взаимной растворимости жидкостей применяется эмпирическое правило, согласно которому *«подобное растворяет подобное»*. Это значит, что вещества, близкие между собой по составу, строению и величине молекул, обычно хорошо растворимы друг в друге. Например, углеводороды хорошо растворяются в углеводородах, спирты – в спиртах и т. д. Предпринималось немало безуспешных попыток использовать то или иное свойство веществ в качестве универсального критерия растворимости жидкости. Однако одну закономерность можно считать достаточно общей: *полярные вещества лучше растворимы в полярных жидкостях, а неполярные – в неполярных*.

Растворимость твердых тел также сильно зависит от их природы, природы растворителя и температуры. В то же время давление, в отличие от растворимости газов в жидкостях, слабо влияет на растворимость в жидкостях твердых тел. Растворение твердого вещества в жидкости обычно сопровождается поглощением тепла (эндотермический процесс), которое расходуется на разрушение его кристаллической решетки, поэтому в соответствии с *принципом Ле-Шателье* растворимость твердых тел в большинстве случаев увеличивается при нагревании.

При некоторой концентрации  $c$  вещества в растворе достигается его насыщенное состояние, при котором раствор находится в устойчивом равновесии с растворенным веществом. При дальнейшем добавлении вещества оно уже не растворяется, а выпадает в осадок. Концентрацию  $c$  принято называть *растворимостью вещества в данном растворителе*.

На растворимость влияет множество факторов: температура, дисперсность (измельченность) вещества, продолжительность контакта, наличие или отсутствие в составе растворителя и вещества однородных химически активных групп, молекулярная масса и полярность.

С ростом температуры, степени дисперсности, усилением поверхностного взаимодействия растворителя и вещества растворимость последнего повышается.

Растворимость существенно увеличивается под действием механических колебаний, особенно УЗ-частоты, что может быть в значительной мере обусловлено усилением поверхностного взаимодействия. С ростом молекулярной массы растворимость различных веществ в одних и тех же жидкостях уменьшается.

В капиллярном методе контроля явление растворения сопровождается все операции, начиная с приготовления дефектоскопических материалов (растворение красителей, люминофоров, очистителей), при подготовке объекта к контролю (для очистки полостей дефектов), при пропитке дефектов пентрантами, проявлении и при окончательной очистке объекта после контроля.

### 5 Давление насыщающего пара, капиллярная конденсация

Благодаря тепловому движению некоторая часть молекул на поверхности жидкости имеет достаточно большие скорости, чтобы преодолеть силы когезии, удерживающие молекулы в жидкости, и покидает жидкость. Это явление называют *испарением*. В результате столкновения молекулы пара могут снова оказаться вблизи поверхности жидкости и проникнуть вглубь. Таким образом, отдельные молекулы покидают жидкость и вновь возвращаются в нее. Если вылетает больше молекул, чем возвращается обратно, жидкость испаряется. Если, наоборот, вылетает меньшее число молекул, чем возвращается, происходит *конденсация* пара. В том случае, когда жидкость покидает столько же молекул, сколько возвращается, устанавливается равновесие между паром и жидкостью. Пар в этом случае называют *насыщенным*.

Давление насыщенного пара при неизменной температуре является постоянной величиной (таблица 8.2)

Таблица 8.2 – Давление насыщенного пара для некоторых веществ при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

В килопаскалях

Вещество	$P$	Вещество	$P$
Ацетон	24,00	Ртуть	$1,63 \cdot 10^{-4}$
Бензол	10,00	Толуол	2,93
Вода	2,34	Хлороформ	21,30
Метиловый спирт	12,90	Этиловый спирт	5,87

Для раствора давление насыщенного пара складывается из давлений насыщенных паров компонентов раствора с учетом их концентраций и определяется *законом Рауля*.

Величина давления насыщенного пара характеризует *летучесть* жидкости. Эта характеристика является практически весьма важной для жидкой фазы проявителей при использовании их в полевых условиях, особенно в

осенне-зимний период, когда температура воздуха понижается и производительность процесса контроля резко падает вследствие долгого высыхания проявителя. Кроме того, летучесть связана с экологической безопасностью дефектоскописта, а также с пожаро- и взрывобезопасностью всего объекта.

*Капиллярная конденсация* – это конденсация пара в капиллярах и микротрещинах пористых тел, а также в промежутках между тесно сближенными твердыми частицами или телами.

Капиллярная конденсация начинается с адсорбции молекул пара поверхностью конденсации и образования менисков жидкости, т. к. имеет место смачивание, форма менисков в капиллярах – вогнутая, и давление насыщенного пара над ними  $p$  ниже, чем давление насыщенного пара  $p_0$  над плоской поверхностью. Таким образом, капиллярная конденсация происходит при более низких, чем  $p_0$  давлениях. Объем жидкости, сконденсировавшейся в порах, достигает предельной величины при  $p = p_0$ . В этом случае поверхность раздела «жидкость – газ» имеет нулевую кривизну (плоскость).

Капиллярная конденсация увеличивает поглощение (сорбцию) паров пористыми телами, в особенности вблизи точки насыщения паров. Капиллярная конденсация может привести к значительному ухудшению свойств применяемых в капиллярной дефектоскопии проявителей при их хранении в неплотно закрытых емкостях, особенно в условиях повышенной влажности.

## **6 Диффузия**

*Диффузия* (от лат. *diffusion* – распространение, растекание) – движение частиц (молекул, атомов) среды, приводящее к переносу вещества и выравнивающее концентрацию частиц разного сорта (молекулы, ионы и др.) под действием их беспорядочного теплового движения.

Количество диффундирующего вещества  $Q$  в направлении  $x$  через сечение  $S$  за время  $t$  определяется в условиях установившегося диффузионного потока *первым законом Фика*:

$$dQ = -D \frac{dc}{dx} dS dt, \quad (8.5)$$

где  $c$  – концентрация вещества;  $D$  – коэффициент диффузии (постоянный для данной пары веществ при заданной температуре), численно равен массе вещества, диффундирующего в единицу времени через единичную площадку (плотность потока массы):

$$j_m = -D \frac{dc}{dx} = \frac{dQ}{dS dt}. \quad (8.6)$$

Например, когда вносят кристалл в жидкость, в которой он может раствориться, от его поверхности отделяются молекулы, которые благодаря диффузии равномерно распределяются по всему объему растворителя. Таким образом, если растворение представляет собой процесс проникновения

одного вещества в другое, то диффузия характеризует дальнейшее распространение уже проникшего одного вещества в другом.

Диффузия имеет место практически при всех операциях капиллярного контроля, но наиболее ощутима ее роль при заполнении тупикового дефекта индикаторной жидкостью, которая по мере проникновения в полость дефекта сжимает запираемый в нем газ (обычно воздух).

Современные дефектоскопические материалы для капиллярного контроля позволяют обнаруживать микротрещины шириной раскрытия  $< 1$  мкм. Это означает, что запираемый в тупиковых полостях воздух очень сильно сжимается под действием капиллярного давления, которое тем больше, чем меньше поперечный размер канала. В результате сжатый воздух растворяется в дефектоскопической жидкости и, поскольку его концентрация в области мениска значительно выше, чем в устье дефекта, диффундирует к выходу. Освободившийся объем капилляра заполняет пенетрант. Следует отметить, что если глубина выявляемых поверхностных дефектов достигает нескольких миллиметров и градиент концентрации растворенного в индикаторном пенетранте воздуха очень велик, то процесс замещения воздуха пенетрантом протекает достаточно быстро.

Процесс перемещения мениска жидкости в капиллярной трещине за счет растворения и диффузии воздуха, запертого в тупиковом капилляре, называется *диффузионной пропиткой*, точнее – *диффузионной стадией заполнения капилляра пенетрантом*.

Продолжительность стадии заполнения дефектов пенетрантом в зависимости от объектов контроля и технологических требований обычно изменяется от 5 до 60 мин. Этого времени достаточно, чтобы только за счет диффузии глубина заполнения пенетрантом полости дефекта с шириной раскрытия  $R < 10$  мкм увеличилась в два и более раза по сравнению с глубиной капиллярной пропитки. Кинетика диффузионной стадии заполнения капилляра будет рассмотрена позже.

Важную роль играет процесс диффузии в процессах проявления с использованием суспензионных проявителей. Вначале идет взаимодиффузия пенетранта и жидкой фазы проявителя. Затем по мере высыхания слоя проявителя пенетрант уже за счет капиллярных сил проникает в пористую структуру слоя, образуя индикаторный след дефекта на поверхности изделия.

### **7 Заполнение тупиковых капилляров**

Заполнение тупикового капилляра отличается от заполнения сквозного тем, что газ (воздух), сжатый вблизи тупикового конца, ограничивает глубину проникновения пенетранта.

Заполнение тупиковой щели с непараллельными стенками (хорошо имитирует реальные трещины) или конического капилляра (имитирует поры) более сложно, чем капилляров постоянного сечения. Уменьшение поперечного сече-

ния по мере заполнения вызывает увеличение капиллярного давления, но еще быстрее уменьшается объем, заполненный сжатым воздухом, поэтому глубина заполнения такого капилляра (при одинаковом размере устья) меньше, чем капилляра постоянного сечения.

Реально предельная глубина заполнения тупикового капилляра оказывается, как правило, больше расчетного значения. Это происходит за счет того, что воздух, сжатый вблизи конца капилляра, частично растворяется в пенетранте, диффундирует в него (*диффузионная пропитка*).

Различие объясняется тем, что после процесса довольно быстрого капиллярного заполнения начинается значительно более медленный процесс диффузионного заполнения. Отсюда следует необходимость длительного времени пропитки.

Это явление имеет место для полярных жидкостей (вода, спирты и др.) в капиллярах с уменьшающимся по длине канала поперечным сечением (конические поры, клиновидные трещины и т. п.).

В ряде случаев к моменту полного заполнения жидкостью конического капилляра объем жидкости в тупиковой части может значительно превышать объем жидкости у устья капилляра, что означает преимущественное заполнение канала со стороны тупика.

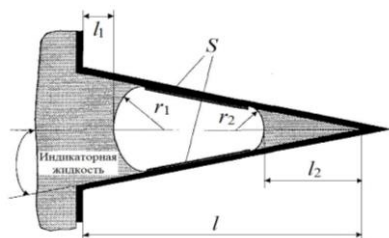


Рисунок 8.5 – Двустороннее заполнение тупикового капилляра индикаторной жидкостью:

$r_1$  и  $r_2$  – радиусы менисков,  $S$  – пристеночный пленочный адсорбционный слой индикаторной жидкости;  $h_1$  – глубина проникновения жидкости у входа в капилляр;  $l_2$  – глубина столбика жидкости у вершины капилляра

В тупиковых цилиндрических капиллярах, погруженных в любую смачивающую их жидкость явление двустороннего заполнения капилляра не наблюдается, и они заполняются только с одной стороны.

Установлено, что механизм двустороннего заполнения тупиковых конических капилляров основан на перетекании жидкости по тонкой смачивающей пленке  $S$  (рисунок 8.5), существующей всегда, в силу наличия раскливающего давления.

*Явление двустороннего заполнения жидкостью тупиковых капилляров* состоит в том, что при погружении конического капилляра в жидкость наблюдается заполнение канала капилляра не только со стороны его устья (входа), но и со стороны тупиковой части.

### 8 Сорбционные явления

*Сорбционные явления* (от лат. *sorbeo* – поглощаю) – совокупность физико-химических процессов, в результате которых происходит поглощение

каким-либо веществом газа, пара или растворенного вещества из окружающей среды.

Состояние вещества у поверхности раздела соприкасающихся фаз отличается от его состояния внутри этих фаз вследствие различия молекулярных полей в разных фазах.

Рассмотрим, например, поверхность твердого тела на границе с газом. Внутри твердого тела взаимодействия частиц (атомов, ионов или молекул) уравновешены. На поверхности же взаимодействия частиц не уравновешены, поэтому поверхность твердого тела притягивает молекулы из соседней газовой фазы. При этом концентрация молекул газа становится вблизи поверхности больше, чем в его объеме, т. е. газ адсорбируется поверхностью твердого тела.

Явление концентрации вещества на поверхности раздела фаз называется *адсорбцией*. Вещество, на поверхности которого происходит адсорбция, называется *адсорбентом*, а поглощаемое из объемной фазы вещество – *адсорбтивом* (или *адсорбатом*). Адсорбент поглощает из объемной фазы тем больше вещества, чем больше его поверхность. Следовательно, высокодисперсные порошковые проявители, используемые в капиллярном контроле, являются весьма активными адсорбентами.

Кроме явления концентрирования вещества в поверхностном слое у границы раздела фаз (адсорбции) существует также явление объемного поглощения вещества – *абсорбция*.

В различных случаях адсорбции большое значение имеют как физические, так и химические взаимодействия между адсорбентом и адсорбтивом.

При *физической адсорбции* частицы адсорбтива не взаимодействуют с поглотителем, т. е. за исключением состояния его поверхности индивидуальные свойства адсорбента не играют существенной роли. Поэтому процесс физической адсорбции неспецифичен, и равновесие между участвующими в процессе адсорбции фазами устанавливается практически мгновенно.

*Химическая адсорбция (хемосорбция)* связана со значительной перестройкой электронных оболочек адсорбирующейся молекулы и молекул адсорбента, расположенных на его поверхности с последующим образованием химического соединения. Физическая и химическая адсорбции характеризуются различными значениями *теплоты адсорбции*  $q_a$ . Для физической адсорбции  $q_a \approx 4 \dots 40$ , а для химической  $q_a \approx 40 \dots 400$  кДж/моль.

При постоянной температуре физическая адсорбция увеличивается с ростом давления газа или концентрации раствора. Увеличение температуры приводит к уменьшению физической адсорбции, т. к. при этом возрастает число молекул адсорбтива, способных преодолеть притяжение к поверхности, и происходит десорбция. Скорость химической адсорбции с увеличением температуры возрастает. Обе эти характеристики процесса растут с

увеличением концентрации поглощаемого вещества в растворе и зависят от геометрической структуры сорбента и скорости перемешивания.

В качестве отрицательной роли адсорбции следует упомянуть, например, удержание на поверхности контролируемых изделий жиров, масел и других загрязнений, снижающих эффективность капиллярного контроля.

### 9 Взаимодействие «жидкость – жидкость» в капилляре

В процессе контроля дефект заполняется разными жидкими дефектоскопическими материалами. Сначала это моющая жидкость, затем капилляр заполняет индикаторная жидкость. После этого индикаторная жидкость удаляется с поверхности очищающей жидкостью, и наконец, индикаторная жидкость вступает в контакт с жидкой фазой проявителя.

Рассмотрим самый общий случай, когда в тупиковом капилляре находится жидкость Ж<sub>1</sub> (рисунок 8.6) и с ней в контакт приводится вторая жидкость Ж<sub>2</sub>, химически не реагирующая и не смешиваемая с ней (рисунок 8.7).

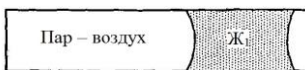


Рисунок 8.6 – Жидкость Ж<sub>1</sub> в цилиндрическом капилляре

В зависимости от поверхностного натяжения жидкостей ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) давления насыщенного пара ( $P_1, P_2$ ), краевого угла смачивания ( $\theta_1, \theta_2$ ) возможны два крайних варианта их взаимодействия (см. рисунок 8.7).

В первом случае приведенная в контакт с жидкостью Ж<sub>1</sub> жидкость Ж<sub>2</sub> полностью вытесняет из капилляра Ж<sub>1</sub> и занимает ее место (рисунок 8.7 а). Это случай полного извлечения жидкости из капилляра. Находящийся в капилляре индикаторный пенетрант ЛЖ-6А (Ж<sub>1</sub>) извлекается, например, ацетоном, пентаном, бензолом, бутиловым и этиловым спиртами. Во втором случае жидкость Ж<sub>2</sub> запирает Ж<sub>1</sub> в капилляре и не дает ей выйти наружу из капилляра (рисунок 8.7, б).

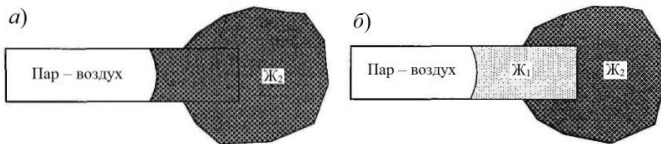


Рисунок 8.7 – Взаимодействие двух жидкостей в капилляре:

- а – полное извлечение; жидкость Ж<sub>2</sub> полностью вытесняет из капилляра жидкость Ж<sub>1</sub> и занимает ее место; б – отсутствие замещения жидкостей; жидкость Ж<sub>2</sub> запирает жидкость Ж<sub>1</sub> в капилляре

На основании анализа термодинамики процесса установлено, что если удовлетворяется условие

$$\sigma_1 \cos \theta_1 > \sigma_2 \cos \theta_2, \quad (8.7)$$

то жидкость Ж<sub>2</sub> полностью вытеснит из капилляра Ж<sub>1</sub> и займет ее место (случай полного извлечения). Если перечисленные жидкости берутся в об-



ратном порядке (жидкость 2 в капилляре), то извлечение жидкости из капилляра контактирующей с ней другой жидкостью не наблюдается. Знание этого критерия позволяет прогнозировать результаты взаимодействия различных дефектоскопических жидкостей.

Хотя реальные дефекты, выявляемые капиллярными методами, существенно отличаются от использованных в экспериментах моделей как формой, так и состоянием поверхности канала, тем не менее общий характер описанного взаимодействия сохраняется и для них.

Например, при нанесении проявителя в зависимости от соотношения свойств индикаторного пенетранта, находящегося в дефектах ( $\sigma_n \cos \theta_n$ ) и жидкой фазы проявителя ( $\sigma_{np} \cos \theta_{np}$ ), взаимодействие жидкостей в капилляре может либо облегчать извлечение пенетранта из капилляра, либо затруднять его. Если

$$\sigma_n \cos \theta_n < \sigma_{np} \cos \theta_{np}, \quad (8.8)$$

то в результате взаимодействия жидкой фазы проявителя и пенетранта уже с момента приведения их в контакт наблюдается вытеснение пенетранта к выходу из капилляра, что обеспечивает увеличение полноты и скорости извлечения пенетранта из дефекта и повышение надежности и чувствительности контроля.

Заметим, что рассмотренное выше взаимодействие жидкостей в капилляре играет важную роль и при очистке дефектов перед контролем. Например, в случае, когда остатки моющей жидкости не дают индикаторной жидкости попасть в дефект, дефект не будет выявлен. Знание критерия (8.8) позволяет обоснованно составлять дефектоскопические наборы, повышая эффективность их действия.

### 10 Вязкость

*Вязкость* (внутреннее трение, обусловленное межмолекулярным взаимодействием) – свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Величина этого сопротивления характеризуется *коэффициентом динамической вязкости*  $\mu$  (измеряется в Па·с или пуазах (таблица 8.3)).

Таблица 8.3 – Динамическая вязкость жидкостей при 20 °С

Жидкость	Динамическая вязкость, $10^{-3}$ Па·с	Жидкость	Динамическая вязкость, $10^{-3}$ Па·с
Вода	1,002	Глицерин	1,500
Этиловый спирт	1,200	Ртуть	1,554

Величина, обратная динамической вязкости  $\varphi = 1/\mu$ , называется текучестью.

Наряду с динамической вязкостью различают кинематическую вязкость  $\nu = \mu/\rho$ , где  $\rho$  – плотность ( $\nu$  измеряется в  $\text{м}^2/\text{с}$  или в *стоксах*).

*Размерный эффект* вязкости заключается в повышении эффективной вязкости полярных жидкостей при их течении в микрокапиллярах поперечным размером  $<1$  мкм. Следует отметить, что большинство индикаторных пенетрантов являются полярными жидкостями.

В микрокапиллярах радиусом  $\sim 10^{-8}$  м вязкость  $\mu$  таких жидкостей может быть на 60–70 % выше их табличных, справочных значений  $\mu$  для данной температуры. Размерный эффект вязкости полярных жидкостей объясняется наличием не только поступательных, но и вращательных степеней свободы микроэлементов полимолекулярных ассоциатов полярных жидкостей.

Поскольку поперечные размеры выявляемых поверхностных дефектов в подавляющем большинстве случаев превышают значения, при которых проявляется размерный эффект вязкости, последний не оказывает ощутимого влияния на кинетику капиллярного впитывания пенетрантов в дефекты. В то же время эффективный радиус пор многих сорбционных проявителей составляет десятые и даже сотые доли микрометра. При этом рассматриваемое явление будет замедлять процесс образования индикаторных следов дефектов.

### ***11 Роль ПАВ в образовании многофазных сред***

*Поверхностно-активные вещества (ПАВ)* – вещества, способные накапливаться на поверхности раздела двух тел (сред, фаз), снижая ее свободную энергию.

В капиллярной дефектоскопии они применяются для улучшения свойств дефектоскопических материалов. В качестве дефектоскопических материалов поверхностно-активные вещества используются, главным образом, для реализации следующих задач:

- для улучшения смачивания контролируемой поверхности жидкостями, которые очищают контролируемую поверхность, повышая качество и производительность очистки;
- с целью стабилизации однородности суспензионных проявителей и других многокомпонентных сред.

Разработано большое количество ПАВ, растворимых в воде, спиртах и других растворителях. В капиллярной дефектоскопии чаще применяют водорастворимые ПАВы.

Проиллюстрируем действие ПАВ при смывании масляной пленки. Обычная вода ее не смачивает и не удаляет. Молекулы ПАВ в воде адсорбируются на поверхности пленки, в результате чего масло переходит в эмульсию и жировая пленка исчезает.

Поверхностно-активные вещества используются при проведении практически всех технологических процессов капиллярного контроля, но особо активную роль они играют при получении многофазных сред, диспергировании и эмульгировании.

*Диспергирование* (от лат. *dispergo* – рассеиваю, рассыпаю) – тонкое измельчение твердых тел и жидкостей в некоторой другой среде, приводящее к образованию дисперсных систем: порошков, суспензий, эмульсий. Процесс диспергирования используется в капиллярной дефектоскопии, прежде всего, для получения дефектоскопических материалов, таких как порошковые проявители. Степень дисперсности частиц проявителя значительно влияет на чувствительность капиллярного контроля. Диспергирование производят с помощью мельниц различной конструкции (шаровых, вибрационных, коллоидных, струйных и др.), звуковых и УЗ-вибраторов.

Дисперсные системы, состоящие из частиц твердого тела, распределенных в жидкой дисперсионной среде, называют *суспензиями*. Получают в основном суспензии диспергированием твердых тел в жидкой среде и смешением сухих порошков с жидкостями. Суспензии неустойчивы, частицы твердого тела довольно быстро выпадают в осадок или всплывают.

В капиллярной дефектоскопии используется суспензия окрашенных или люминесцирующих частиц размером от нескольких до десятков микрометров. Один из методов так и называется – *метод фильтрующих суспензий*.

Дисперсия жидкостей в жидкой дисперсионной среде называется *эмульсией* (взвесь капелек дисперсионной фазы в дисперсионной среде), а процесс образования последней – *эмульгированием*. Классический пример эмульсии – молоко, состоящее из мельчайших капелек жира, взвешенных в воде и стабилизированных белками. Эмульсии, как известно, неустойчивы, для активизации эмульгирования и сохранения эмульсии в стабильном состоянии применяют специальные вещества – эмульгаторы (поверхностно-активные вещества).

Процессы образования многофазных сред, суспензий и эмульсий играют очень важную роль и используются, прежде всего, при подготовке детали к контролю. Результатом этих процессов является измельчение всевозможных загрязнений, их отрыв от детали, переход в связанное состояние в виде эмульсий и суспензий и удаление последних с контролируемой поверхности.

Особый случай представляет собой мелкодисперсная суспензия (коллоид) магнитных частиц размером от 30 до 150 Å в жидких средах (вода, нефтепродукты, спирты), называемая *магнитной жидкостью*. Она обладает высокой устойчивостью, обусловленной тем, что каждая частица магнетика покрыта тонким слоем поверхностно-активного вещества и благодаря этому частицы не слипаются и не выпадают в осадок. Намагниченность жидкостей достигает 400 А/м, температурный диапазон – от –30 до +200 °С, предельная концентрация твердой магнитной фазы достигает 25–27 об. %. Магнитные жидкости как среды, управляемые магнитным полем, перспективны для ускорения и увеличения глубины заполнения капиллярных несплошностей,

например, специальным пенетрантом на основе магнитной жидкости. Использование магнитных полей при проявлении гарантирует ускорение процесса и увеличение степени извлечения пенетранта из дефекта, т. е. повышение чувствительности метода.

### ***12 УЗ-капиллярный эффект***

В капиллярном контроле давно и все более успешно применяются ультразвуковые колебания низких промышленных частот 15–80 кГц, прохождение которых через жидкие среды вызывает такие вторичные акустические явления, как кавитация, акустические течения и др.

*Кавитация* – это образование в жидкости пульсирующих пузырьков (каверн, полостей), заполненных паром, газом или их смесью, при прохождении ультразвуковой волны большой интенсивности.

Давление внутри пульсирующих кавитационных пузырьков может достигать значительных величин  $10^7$ – $10^{11}$  Па; температура внутри пузырька может достигать  $\approx 10^4$  К, может происходить их свечение – звуко-люминесценция. При определенных условиях пузырьки захлопываются с образованием кумулятивных струй, движущихся со скоростью до 10–100 м·с<sup>-1</sup>, при этом струйка всегда направлена к твердой поверхности, что и вызывает сильное гидрокинетическое возмущение жидкости, ее перемешивание, интенсивное излучение акустических (ударных) волн и в конечном итоге – разрушение поверхности. Естественно, если поверхность покрыта твердыми или жидкими загрязнениями или покрытиями, кумулятивные струйки разрушают их целостность, вызывают их диспергирование и эмульгирование и как результат – удаление с поверхности.

Как следует из приведенных данных, влияние УЗ-колебаний на различные технологические операции основывается как на сильных локальных гидродинамических и температурных воздействиях кавитации, так и на их влиянии практически на все физические свойства сред и результаты их взаимодействия.

Наиболее ощутимо влияние УЗ в объемах жидкости на границе с твердой поверхностью (контролируемой, очищаемой и т. д.), когда создаются условия для возникновения УЗ-капиллярного эффекта.

*Ультразвуковой капиллярный эффект* – явление увеличения глубины и скорости проникновения жидкости в капиллярные каналы под действием УЗ (по сравнению с глубиной и скоростью, обусловленными только капиллярными силами). Открытие УЗ-капиллярного эффекта принадлежит академику АН Беларуси Е. Г. Коновалову. В Государственном реестре открытий СССР оно зарегистрировано под № 109 с приоритетом от 31 мая 1961 г.

Наблюдать УЗ-капиллярный эффект проще всего на опыте, схема которого представлена на рисунке 8.8.

В погруженном в воду капилляре под действием капиллярных сил жидкость поднимется на высоту  $H_0$ . Если на дно ванны с жидкостью поместить источник УЗ, то высота и скорость подъема будут в десятки и сотни раз превосходить величину  $H_0$  и высота подъема  $H_{УЗ}$  может достигать 10–15 м.

Достоинство УЗ-обработки состоит в том, что такие экологически-, пожаро- и взрывоопасные традиционные вещества, как бензин, ацетон, спирты можно заменить на воду и водные растворы. Суть в том, что кавитационная активность воды гораздо выше, чем у ацетона, спирта, бензина, поэтому и выше очищающая способность воды и водных растворов. Происходящие при этом УЗ-диспергирование и эмульгирование только ускоряют очистку и повышают ее качество. При необходимости для подготовки поверхности к контролю можно применять УЗ-травление и некоторые другие процессы с применением УЗ.

### 13 Люминесценция, яркостный и цветовой контрасты

*Люминесценция* (от лат. *lumen* – свет) – свечение некоторых веществ (люминофоров), под действием высокоэнергетического излучения (коротковолнового), например, под УФ-освещением. При этом люминофор поглощает коротковолновое излучение и переизлучает его в видимой области спектра.

Одной из основных характеристик люминесценции является ее так называемый выход, под которым принято понимать степень превращения возбуждающей энергии в энергию люминесцентного излучения. На выход люминесценции кроме свойств молекул могут влиять и внешние факторы. Процессы, ведущие к снижению выхода люминесценции, принято называть тушением (или гашением).

Различают два вида тушения: *внешнее* и *внутреннее*.

При *внешнем* тушении происходит передача энергии возбужденных молекул невозбужденным в результате их взаимодействия. К нему относится тушение посторонними примесями.

*Внутреннее* тушение вызывается процессами, происходящими внутри молекулы из-за взаимодействия ее частей. К этому виду тушения могут быть отнесены концентрационное и температурное тушение. По мере роста концентрации люминесцирующего вещества в растворе выход люминесценции возрастает. Соответственно растет и яркость свечения. Однако при

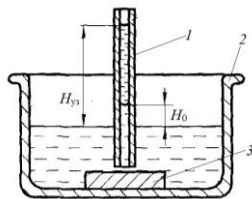


Рисунок 8.8 – Установка для наблюдения за проявлением УЗ-капиллярного эффекта:  
1 – капилляр; 2 – сосуд с жидкостью;  
3 – источник УЗ-колебаний

достижении некоторого определенного значения концентрации дальнейшее увеличение концентрации сопровождается не усилением яркости, а, напротив, ее уменьшением. При значительном повышении концентрации возможно практически полное тушение люминесценции.

Снижение выхода люминесценции с ростом температуры (температурное тушение) обусловлено тем, что с увеличением температуры растет энергия колебательного движения молекул. В результате этого молекула из возбужденного состояния может перейти в некоторое новое устойчивое состояние, соответствующее новому модифицированному состоянию молекулы. Кроме того, с ростом температуры молекулы могут стать настолько активными, что возбуждение их светом приведет к разрыву (полному или частичному).

Явление тушения люминесценции используется, например, с целью уменьшения фона пористой поверхности. Для этого в очищающую жидкость вводят специальные тушители. В результате люминесценция пенетранта, остающегося на поверхности после обработки очищающей жидкостью, резко уменьшается. Однако это явление может играть и отрицательную роль. Например, наличие в полостях дефектов некоторых типов загрязнений приводит в результате тушения люминесценции к уменьшению чувствительности и достоверности контроля.

Кроме этого, люминесценцию используют как один из способов увеличения контраста для визуального обнаружения индикаторных пенетрантов после проявления. Для этого люминофор либо растворяют в основном веществе пенетранта, либо само вещество пенетранта является люминофором.

Основным методом выявления индикаторных рисунков дефектов при контроле капиллярными методами является визуальный осмотр. Глаз человека, являясь наиболее чувствительным из всех известных оптических приборов, способен действовать как в условиях малых, промежуточных, так и больших яркостей. Способность глаза различать мелкие объекты, обладающие достаточным контрастом, определяет *минимальный угол зрения*.

Установлено, что объект в виде полосы (темной, цветной или люминесцирующей) глаз способен заметить с расстояния 200 мм при ее минимальной ширине  $\geq 50$  мкм. В рабочих условиях опытные дефектоскописты различают объекты на порядок меньше. Без применения специальных технических и других средств увеличения меньший объект увидеть не удастся. Возможность различать степень яркости объекта *называют контрастной чувствительностью*.

В цветном методе капиллярного контроля вводят понятие *яркостно-цветового контраста*, одновременно учитывающего яркость и насыщенность цвета индикаторного рисунка дефекта, который нужно обнаружить. Яркостный и цветной контрасты в капиллярном контроле рассматривают с точки зрения возможности глаза человека фиксировать люминесцентное свечение и цветные индикации на светлом фоне. Все данные относят к глазу человека.

Люминесцентный капиллярный контроль выполняется, как правило, в затемненном помещении. Переход от дневного зрения к ночному осуществляется в течение 50–60 мин. За это время глаз приобретает максимальную чувствительность (рисунок 8.9).

Изменение чувствительности зависит от условий перехода от одной освещенности к другой. Наибольшая чувствительность достигается при достаточной адаптации, которая идет более интенсивно при меньшем перепаде освещения.

Люминесцентный метод по условиям работы приближается к условиям порога чувствительности глаза.

**Световой порог** представляет собой наименьшее значение освещенности, создаваемой источником света на зрачке наблюдателя, при котором свет заметен.

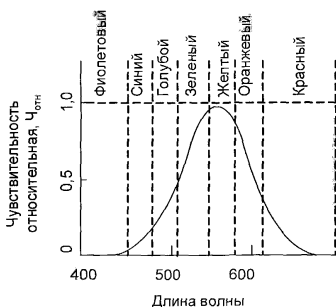


Рисунок 8.10 – Относительная спектральная чувствительность стандартного зрения

Возможности выявления дефектов в значительной мере определяются не только чувствительностью, но и остротой зрения, под которой понимается способность различать единичные мельчайшие объекты, а также разрешающей способностью зрения, под которой понимают способность глаза раздельно воспринимать близко расположенные объекты (точки, линии или другие фигуры).

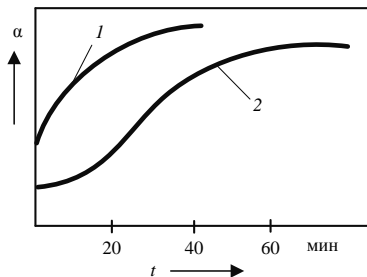


Рисунок 8.9 – Зависимость контрастной чувствительности от времени пребывания в темноте:

1 – переход от слабого освещения к темноте;  
2 – переход от сильного освещения к темноте

**Цветовой порог** – наименьшее значение освещенности на зрачке наблюдателя, при которой различаются не только яркость, но и цвет источника света.

Чувствительность зрения по отношению к излучению различных длин волн  $\lambda$  неодинакова и при нормальном освещении достигает наибольшей величины при  $\lambda = 554$  нм, что соответствует желто-зеленому цвету (рисунок 8.10).

Таким образом, при интенсивностях свечения индикаторных рисунков выше цветового порога наиболее рациональным является желто-

Разрешающая способность глаза в значительной степени зависит от цвета различаемых мелких объектов. Наилучшей разрешающей способностью глаз обладает тогда, когда объекты видны в зеленых или желто-зеленых лучах на темном фоне. При этом он не различает цвета слишком малых объектов, а регистрирует лишь различие яркости.

#### 8.1.4 Классификация методов капиллярного контроля

Методы капиллярного контроля классифицируются в зависимости от следующих признаков [62]:

##### 1) типа проникающего вещества:

– *метод проникающих растворов* – жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве проникающего вещества жидкого индикаторного раствора.

– *метод фильтрующихся суспензий* – жидкостный метод капиллярного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве жидкого проникающего вещества индикаторной суспензии, которая образует индикаторный рисунок из отфильтрованных частиц дисперсной фазы. Разновидности метода: цветной, люминесцентный и люминесцентно-цветной.

##### 2) способа выявления индикаторного рисунка:

– *яркостный (ахроматический)*, основанный на регистрации контраста в видимом излучении ахроматического рисунка на фоне поверхности ОК;

– *цветной*, основанный на регистрации контраста в видимом излучении цветного индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК;

– *люминесцентный*, основанный на регистрации контраста люминесцирующего в длинноволновом УФ-излучении видимого индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК;

– *люминесцентно-цветной*, основанный на регистрации контраста цветного или люминесцирующего индикаторного рисунка на фоне поверхности ОК в видимом или длинноволновом УФ-излучении.

Кроме вышеперечисленных основных методов контроля применяются **комбинированные** капиллярные методы, которые классифицируются в зависимости от характера используемых для интенсификации контроля физических полей и особенностей их взаимодействия с контролируемым объектом.

*Капиллярно-электростатический* метод основан на обнаружении дефектов на неметаллических изделиях по индикаторному следу, образованному скоплением наэлектризованных частиц порошка над пенетрантом, содержащимся в трещине.

*Капиллярно-электроиндукционный* метод основан на обнаружении дефектов в неэлектропроводных объектах электроиндукционным методом по изменению удельной электрической проводимости в зоне дефекта, заполненного пенетрантом.



*Капиллярно-электроразрядный* метод основан на обнаружении дефектов по характеристикам поверхностного разряда в переменном или постоянном электрическом поле при заполнении их пенетрантом со специальными электрическими свойствами.

*Капиллярно-магнитный* метод основан на обнаружении дефектов (поверхностных отдельно от подповерхностных) в намагничиваемых ферромагнитных объектах по индикаторному следу, образованному проявителем, содержащим ферромагнитный порошок в индикаторном пенетранте.

*Капиллярно-радиационный метод поглощения* основан на обнаружении дефектов по поглощению ионизирующего излучения в зоне дефекта, заполненного пенетрантом, поглощающем излучение.

*Капиллярно-радиационный метод излучения* основан на обнаружении дефектов по наличию ионизирующего излучения в зоне дефекта, заполненного радиоактивным пенетрантом.

Комбинированные методы редко применяются в производственных условиях, однако инженер-конструктор, инженер-технолог должны знать их возможности и области использования. В комбинированных методах один из методов должен быть капиллярный жидкостный.

### **8.1.5 Материалы, используемые при капиллярном контроле**

Материалы, применяемые при капиллярном неразрушающем контроле и предназначенные для пропитки дефектов, нейтрализации или для удаления избытка проникающего вещества с поверхности и извлечения (проявления) его остатков из трещины с целью получения первичной информации о наличии несплошности в объекте контроля, называют *дефектоскопическими*.

Одно из основных требований к дефектоскопическим материалам – они не должны быть вредны для человека и испытываемого материала. Например, следует иметь в виду, что компоненты хлора могут оказать вредное воздействие на аустенитную нержавеющую сталь, а компоненты серы – на высоколегированные никелевые стали. Кроме того, материалы не должны быть токсичными, представлять ни взрыво-, ни пожароопасности. Они не должны вызывать коррозию, а наоборот, обладать противокоррозионными свойствами. Дефектоскопические материалы не должны ухудшать эксплуатационных характеристик испытываемых деталей. Правило, как у врачей, прежде всего *не навреди*, ни объекту контроля, ни дефектоскописту, проводящему контроль.

Дефектоскопические материалы выбирают в зависимости от требований, предъявляемых к качеству контролируемых объектов [60]. Их укомплектовывают в целевые наборы, в которые входят:

- пенетрант;

- очиститель объекта контроля от излишков пенетранта (или гаситель пенетранта);
- проявитель.

Дефектоскопические материалы классифицируют в соответствии с таблицей 8.4.

*Условные обозначения дефектоскопических материалов*

Набор дефектоскопических материалов включает условные обозначения типа пенетранта (метода); очистителя или гасителя; проявителя; уровня чувствительности набора.

Например, условное обозначение набора дефектоскопических материалов, состоящего из люминесцентно-цветного пенетранта (III), растворителя в качестве очищающей жидкости (O3), суспензионного проявителя на основе растворителя (П3), обладающего 2-м уровнем чувствительности, имеет вид III-O3-П3-2.

**Таблица 8.4 – Классификация дефектоскопических материалов**

Пенетрант		Очиститель (O)		Проявитель (П)	
Тип	Наименование	Тип	Состав	Тип	Состав
I	Люминесцентный	O <sub>1</sub>	Вода	П <sub>1</sub>	Сухой порошковый
II	Цветной	O <sub>2</sub>	Эмульгатор на органической основе	П <sub>2</sub>	Суспензионный на водной основе
III	Люминесцентно-цветной	O <sub>3</sub>	Растворитель	П <sub>3</sub>	Суспензионный на основе растворителя
		O <sub>5</sub>	Вода с растворителем	П <sub>4</sub>	Проявляющая краска
				П <sub>5</sub>	Проявляющая пленка

*Совместимость дефектоскопических материалов*

Дефектоскопические материалы, входящие в состав набора, должны быть совместимы как между собой, так и с материалом объекта контроля.

Для обеспечения максимальной совместимости дефектоскопических материалов, входящих в состав набора, рекомендуется использовать целевые аттестованные наборы. При этом пенетрант и очищающая жидкость должны приобретаться у одного и того же изготовителя или у разных изготовителей, но с предварительной проверкой на их полную совместимость.

В ряде случаев, в зависимости от материала объекта контроля и типа используемого набора дефектоскопических материалов, до применения набора необходимо определить коррозионную и химическую активность его жидких компонентов.

Дефектоскопические материалы можно использовать в широком диапазоне температур. Образцы дефектоскопических наборов российского и белорусского производства допускают применение от  $-40$  до  $+100$  °С.

Фирма *HELLING GmbH* (ФРГ) предлагает наборы до  $+175$  °С, *BYCOSIN* до  $+200$  °С. *BY-COTEST* (Швеция): *HTRP20* (красный пенетрант для высоких температур, от  $+80$  до  $+260$  °С), *RP20LT* (высокочувствительный красный пенетрант для низких температур от  $-15$  до  $+30$  °С); *SHERWIN BABB Co* (Франция): *DP-51* (красный пенетрант для нормальной температуры), *DP-55* (красный пенетрант для низкой температуры), *PRT 23E* (красный пенетрант для высокой температуры). На рынке имеются дефектоскопические наборы таких фирм, как *ELY CHEMICAL Co* (Великобритания), *MAGNAFLUX*, *MET-L-Chek Co* (США), *CHEMICAL OAKITE* (Канада)

### 8.1.6 Чувствительность капиллярного контроля

В соответствии с СТБ 1172–99 [60] чувствительность набора дефектоскопических материалов определяется способностью выявлять несплошности заданной минимальной ширины раскрытия при определенной глубине в контрольном образце и характеризуется тремя уровнями в соответствии с таблицей 8.5.

**Уровень чувствительности капиллярного контроля** – диапазон значений преимущественного раскрытия несплошности типа единичной трещины определенной глубины.

В соответствии с приведенным выше определением основным параметром, по которому оценивают чувствительность, является **раскрытие дефекта** – поперечный размер дефекта у его выхода на поверхность объекта контроля.

Таблица 8.5 – Уровни чувствительности капиллярного контроля

Уровень чувствительности	Минимальная ширина раскрытия выявляемых несплошностей при использовании заданного набора дефектоскопических материалов, мкм
1	10–500
2	1–10
3	Менее 1

В таблице 8.5 указаны размеры дефекта, соответствующие так называемому **нижнему порогу чувствительности** – минимальной величине раскрытия выявляемого дефекта.

**Порог чувствительности** – минимальное раскрытие несплошности типа единичной трещины определенной глубины, выявляемой с заданной вероятностью по заданным геометрическому или оптическому параметрам индикаторного рисунка.

Размеры дефектов в контрольных образцах определяют металлографическим или другими методами анализа.

Установленный уровень чувствительности достигается при соблюдении следующих условий:

- использование аттестованного набора дефектоскопических материалов, обеспечивающего требуемую чувствительность согласно его паспортным данным;
- соблюдение технологии проведения контроля;
- соответствие атмосферных условий (температуры, влажности, скорости воздуха) НД на дефектоскопические материалы и аппаратуру;
- соответствие шероховатости контролируемой поверхности НД на дефектоскопические материалы;
- отсутствие загрязнений и жировой пленки на контролируемой поверхности и в дефектах для обеспечения доступа в них пенетранта.

Не следует без необходимости стремиться к достижению более высоких уровней чувствительности. Это требует более дорогостоящих материалов, лучшей подготовки поверхности изделия, увеличивает время контроля. Чувствительность – один из основных показателей технической эффективности капиллярного контроля, характеризующий его способность обнаруживать дефекты (обычно трещины) минимальных размеров.

### **8.1.7 Технология капиллярного контроля**

История капиллярного контроля начиналась в 40-х гг. прошлого столетия. Но за более чем 60 лет, метод не претерпел принципиальных изменений, его простые и понятные принципы остались неизменными. В любом *цветном* или *люминесцентном* варианте капиллярный контроль представляет собой неразрывный технологический процесс из следующих друг за другом строго по технологии известных операций (рисунок 8.11) [61].

В капиллярном контроле нет важных и неважных операций. Каждая операция не прощает никаких ошибок, отклонений от технологии, небрежности; любая из этих оплошностей сводит на нет все предыдущие старания, т. к. исправить их нельзя. Чтобы выявить опасные дефекты всё надо повторять с самого начала.

1 *Подготовка объекта к контролю* заключается, прежде всего, в предварительной очистке контролируемой поверхности объекта и полостей несплошностей от всевозможных загрязнений, жировых пленок, лакокрасочных покрытий, моющих составов и дефектоскопических материалов, а также сушке контролируемой поверхности объекта и полостей несплошностей.

2 *Заполнение дефектов индикаторным пенетрантом*. Пенетрант наносится на контролируемую поверхность распылением, кистью, обливанием или погружением в него объекта контроля. Не допускается высыхание пенетранта на контролируемой поверхности, поэтому она должна смачиваться пенетрантом в течение всего времени обработки. Чем больше дефект будет заполнен пенетрантом, тем больше вероятность его обнаружения.

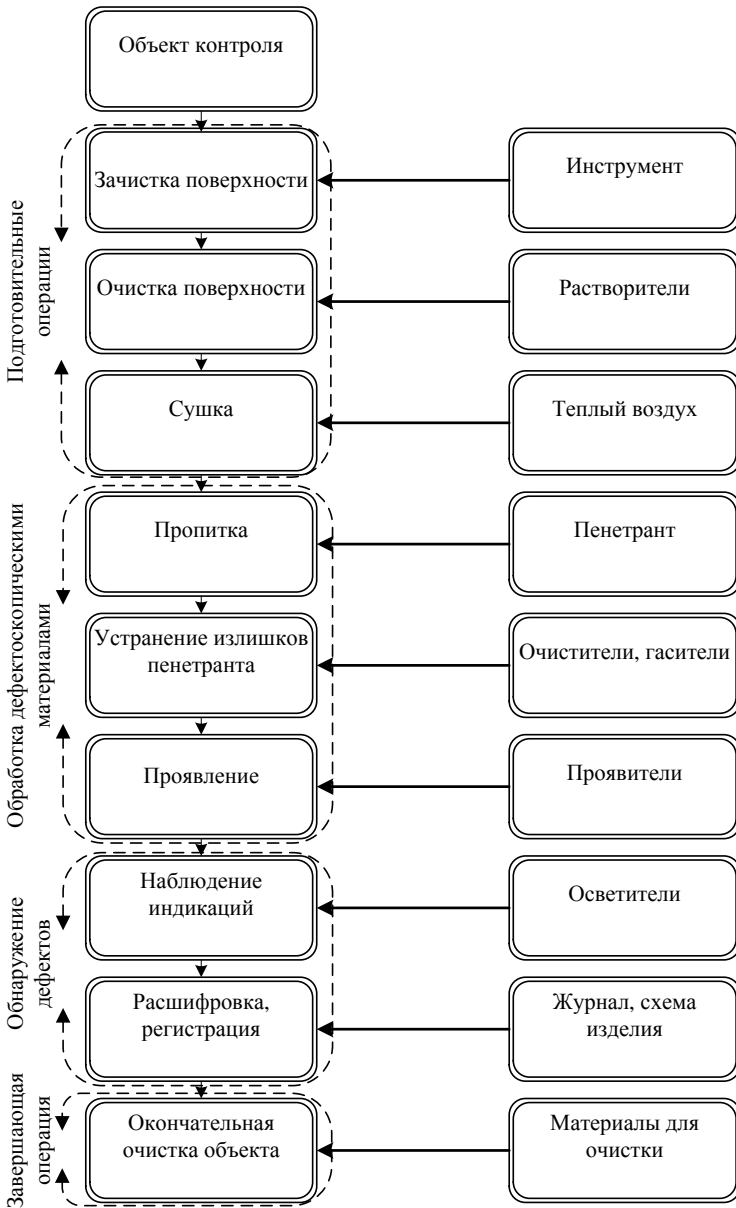


Рисунок 8.11 – Технологическая схема капиллярного контроля

3 *Удаление избытка пенетранта* с контролируемой поверхности осуществляется с применением очистителя или без него в кратчайший промежуток времени от момента окончания заполнения полостей дефектов до момента начала проявления. Способы удаления избытка из полостей дефектов не должны допускать вымывания пенетранта. При использовании фильтрующихся и других типов пенетрантов, не требующих нанесения проявителя, удаление избытка пенетранта, а также нанесение проявителя не производятся.

4 *Проявление* – это процесс извлечения индикаторного пенетранта из дефекта. Чем больше пенетранта из дефекта достигнет слоя проявителя и окрасит его, тем большим будет след и тем легче будет обнаруживаться дефект. Проявитель наносится на контролируемую поверхность объекта распылением, электрораспылением, воздушной взвесью, погружением, обливанием, посыпанием, наклеиванием, кистью тонким равномерным слоем и в кратчайший срок после удаления избытка пенетранта с контролируемой поверхности объекта.

5 *Обнаружение дефектов* происходит в результате визуального осмотра индикаторного рисунка (следа) на проявителе. Размеры (геометрические) светокалористические (энергетические) характеристики индикаторного рисунка несут определённую информацию о дефекте и его опасности. Первичный осмотр рекомендуется производить сразу после нанесения проявителя или после высыхания его слоя. Это облегчает последующую расшифровку индикаторных рисунков дефектов. Заключительный осмотр выполняется по истечении времени проявления. Для визуального осмотра могут использоваться лупы.

6 *Регистрация результатов контроля* производится путем текстового описания, эскиза, фотографирования, видеозаписи или на плёнке проявителя. После регистрации делается заключение об опасности каждого выявленного дефекта.

7 *Оформление результатов контроля* осуществляется в соответствии с СТБ 1172–99 [61] и другими нормативными документами отрасли, предприятия или его подразделения.

8 *Окончательная очистка объекта контроля* заключается в удалении, в основном, проявителя – протиркой, промывкой, обдувкой, выжиганием. Очистка объектов контроля после их заключительного осмотра необходима в тех случаях, когда дефектоскопические материалы могут затруднять последующую обработку объекта контроля или нарушить условия его эксплуатации.

Перечислим необходимые условия выявления бездефектных деталей, которые обеспечат долговечную безаварийную работу машин и механизмов:

- качественные аттестованные наборы дефектоскопических материалов, обладающие требуемой чувствительностью;
- строгое соблюдение технологии каждой операции по обработке детали дефектоскопическими материалами и технологической последовательностью всех операций;
- тщательно очищенные полость дефекта и контролируемая поверхность изделия, обеспечивающие доступ пенетранта к устью дефекта и его заполнение;
- квалификация дефектоскописта, соответствующая проводимой им работе и подтвержденная сертификатом соответствующего уровня.

Методика контроля должна соответствовать требованиям стандарту СТБ 1172–99 [61], нормативным документам отрасли и предприятия. Технологические режимы операций контроля (продолжительность, температура, давление, интенсивность внешних физических воздействий) устанавливаются в зависимости от требуемого уровня чувствительности, используемого набора дефектоскопических материалов, особенностей объекта контроля и типа искомых дефектов, условий контроля и применяемой аппаратуры. Ответственность за соблюдение технологического режима несёт дефектоскопист.

### **8.1.8 Условные обозначения обнаруженных дефектов.**

#### **Запись технологии контроля при оформлении результатов**

Обнаруженные дефекты могут быть охарактеризованы по следующим признакам [60]:

- локализации:
  - А – единичные;
  - Б – групповые, расположенные в ограниченных зонах контролируемой поверхности объекта;
  - В – повсеместно распределенные;
- ориентации относительно главных осей объекта контроля:
  - || – параллельные;
  - ⊥ – перпендикулярные;
  - < – расположенные под углом;
  - без знака – дефекты, не имеющие преобладающей ориентации;
- допустимости [65]:
  - – допустимые (малозначительные или исправимые);
  - без знака – недопустимые (критические, значительные, неисправимые).

Дефекты, приведенные выше, относятся к поверхностным. К обозначению «сквозной дефект» добавляется знак «\*». Например, единичный сквозной дефект обозначают А\*.

*Примеры обозначения характерных дефектов:*

Ⓐ|| – единичные допустимые дефекты, расположенные параллельно главной оси объекта контроля;

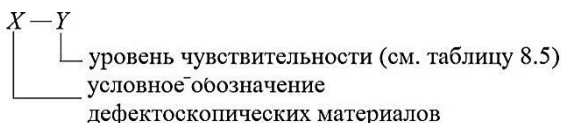
Ⓑ⊥ – групповые допустимые дефекты, расположенные перпендикулярно к оси объекта контроля;

<Ⓑ – повсеместно распределенные допустимые дефекты, расположенные под углом к оси объекта контроля;

Ⓑ – повсеместно распределенные допустимые дефекты без преобладающей ориентации;

А – единичные недопустимые дефекты без преобладающей ориентации.

*Пример записи технологии контроля:*



### 8.1.9 Технические средства, используемые при капиллярном контроле

К основным техническим средствам капиллярного контроля могут быть отнесены: источники УФ-облучения, портативные дефектоскопические комплекты, стационарные лабораторные и цеховые установки, а также крупные механизированные дефектоскопические линии массовых производств, состоящие из полного набора дефектоскопических приборов и устройств.

Приборы капиллярного НК – это устройства, с помощью которых получают, передают и преобразуют информацию о технологических операциях, дефектоскопических материалах или наличии несплошности для непосредственного восприятия оператором или средством, его заменяющим.

Вспомогательными средствами капиллярного НК считают ванны, камеры, столы, контейнеры, кисти, распылители и т. п., которые служат для выполнения или интенсификации одной или нескольких технологических операций капиллярного НК без измерения и регулирования их параметров.

Совокупность основных технических средств капиллярного НК, вспомогательных средств и образцов для испытаний, которыми с помощью набора



дефектоскопических материалов осуществляют технологический процесс контроля, называют *капиллярным дефектоскопом*. Сведения о требованиях к техническим средствам можно найти в различных нормативных документах [60, 64–67].

В институте прикладной физики НАН Беларуси разработана компьютеризированная установка для автоматизированной объективной количественной оценки чувствительности капиллярного контроля и качества наборов дефектоскопических материалов, сертификации вновь разрабатываемых наборов (рисунок 8.12).

Оценка чувствительности контроля и качества наборов осуществляется путем автоматической регистрации и локализации индикаторных рисунков дефектов, выявленных на контролируемой поверхности стандартных образцов, с последующим измерением их геометрических и оптических характеристик. Оценка выполняется на основе вычисления коэффициента визуализации, комплексно учитывающего основные геометрические и оптические характеристики изображений индикаторных рисунков дефектов.

Установка состоит из следующих основных компонентов: приемник изображения (1); объектив (2); набор оптических фильтров (3); источники освещения контролируемой поверхности (4); компьютер; программное обеспечение. Компьютеризированная установка позволяет регистрировать индикаторные рисунки дефектов, выявленных на контролируемой поверхности стандартных образцов, и выдавать оценочные значения коэффициента визуализации не более чем за 5 мин.

В качестве стандартных образцов могут использоваться любые образцы, соответствующие принятым стандартам. Размер индикаторных рисунков дефектов, регистрируемых установкой, составляет  $\geq 0,3$  мм. Результаты оценки могут представляться в числовой и графической формах. Регистрируемое изображение и результаты оценки хранятся в памяти компьютера и могут быть выведены на печатающее устройство.

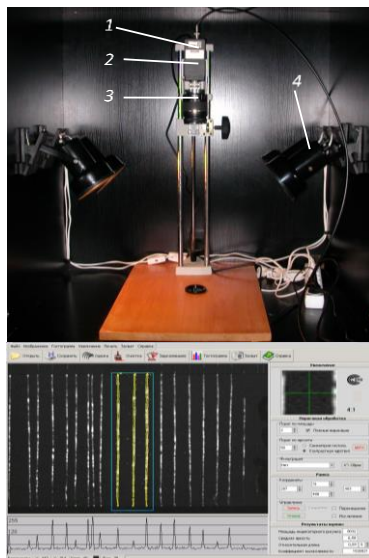


Рисунок 8.12 – Внешний вид установки (а) и представление результатов измерений на экране монитора (б)

Программное обеспечение позволяет проводить количественную оценку выявляемости дефектов на основе подсчета геометрических (площадь) и оптических (яркость, контраст) характеристик следа дефекта.

Применение установки обеспечивает значительное повышение производительности, надежности и достоверности капиллярного контроля.

#### **8.1.10 Объекты контроля и области применения капиллярных методов контроля**

Капиллярный контроль предназначен для обнаружения невидимых или слабо видимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности (для дефектов типа трещин) и ориентации по поверхности. Капиллярный контроль позволяет диагностировать объекты любых размеров и формы, изготовленные из немагнитных материалов, изделия, имеющие сложную форму с затрудненным доступом к дефектам.

Капиллярный контроль применяют также для объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достичь требуемой чувствительности магнитопорошковым методом или магнитопорошковый метод контроля не допускается применять по условиям эксплуатации объекта. В настоящее время уже разработаны методы капиллярного контроля пористых изделий и материалов, например, таких перспективных материалов, как керамические изделия, находящие всё большее применение в машиностроении, автомобильной промышленности, медицине.

Достоинством капиллярного метода является то, что с его помощью можно не только обнаружить поверхностные и сквозные дефекты, но по их расположению, протяженности, форме и ориентации по поверхности можно получить ценную информацию о характере дефекта и даже некоторых причинах его возникновения (концентрация напряжений, несоблюдение технологии и пр.).

Капиллярный метод выявляет только дефекты, имеющие выход на поверхность детали. Если дефект будет неглубоким, то пенетрант не будет задерживаться и будет вымываться из дефекта, и такой дефект нельзя обнаружить капиллярным методом. Для работы капиллярного метода надо, чтобы глубина дефекта не менее чем в 10 раз превосходила раскрытие дефекта.

Важным достоинством капиллярного метода, особенно люминесцентного, является высокая чувствительность (0,1–500 мкм). С помощью капиллярного метода выявляются сварочные, термические, шлифовочные, усталостные, деформационные трещины, пористость.

Главные недостатки капиллярного НК:

- большие трудоёмкость, многооперационность и продолжительность процесса контроля;
- сравнительно большая доля ручного труда;
- трудно поддается автоматизации;
- некоторые дефектоскопические материалы токсичны и пожароопасны;
- УФ-облучение влияет на здоровье дефектоскописта;
- чувствительность к точности выполнения технологических операций;
- результаты контроля во многом зависят от квалификации дефектоскописта, его самочувствия в момент контроля, а также его добросовестности;
- переработка отходов капиллярного контроля при его массовом применении требует проведения специальных мероприятий по пожарной безопасности и охране окружающей среды.

Развитие капиллярных методов контроля в настоящее время связано, прежде всего, с ликвидацией указанных выше недостатков.

Следует упомянуть, что капиллярный контроль может входить в состав комплекса методов (капиллярный, ультразвуковой, вихретоковый), которые применяются для критичных деталей, например, лопатки турбин отдельных видов газотурбинных двигателей.

## 8.2 Методы и средства течеискания

**Течеискание** относится к виду НК качества изделий проникающими веществами [7].

**Техника течеискания** – это область техники, выявляющая нарушения герметичности, вызванные наличием течей [68, 69].

Рассмотрим некоторые принципиальные термины, используемые в этой области [70].

*Герметичность* – свойство изделия или его элементов, исключающее проникновение через них газообразных и (или) жидких веществ.

Абсолютная герметичность изделий недостижима и неконтролируема, поскольку все применяемые в технике материалы могут иметь сквозные дефекты, недоступные для регистрации существующими средствами контроля. Поэтому герметичными принято считать изделия, если эти дефекты, не влияют на сохранение технических характеристик герметизированного изделия в течение всего срока эксплуатации или не ухудшают его характеристик за время хранения.

Количественной характеристикой герметичности является *степень герметичности*. Она определяется суммарным расходом вещества через *течи*.

Следовательно, чтобы повысить **степень герметичности** изделия, необходим строгий выбор материалов при его разработке (с малой проницаемостью, высокой прочностью, хорошей свариваемостью и т. п.), а технология

изготовления должна быть на высоком, соответствующем поставленной задаче уровне.

В общем случае нарушение герметичности связано с наличием в объекте сквозных капиллярных каналов (*течи*) или проницаемостью основного материала с ненарушенной структурой.

Определение геометрических размеров течей – весьма трудная и, как правило, неразрешимая задача, поскольку течь – это канал совершенно неопределенной формы. Как правило, малые характерные размеры течей исключают возможность их визуального наблюдения или обнаружения всеми другими методами дефектоскопии, кроме методов проникающих веществ. Малые размеры сечений и неоднородность их по длине произвольно извилистых каналов не позволяют характеризовать течи геометрическими размерами.

Поэтому в технике течеискания о наличии течей судят по количеству газа или жидкости, протекающему через них в единицу времени, а величину течи принято определять потоком проникающих через нее веществ.

*Поток газа* – это количество газа, протекающее через канал-течь. Это одно из основных понятий, используемых в течеискании. Выражение для него получают следующим образом.

Количество газа  $Q = PV$ , где  $P$  – давление газа;  $V$  – объем, занимаемый газом.

Изменение количества газа при постоянстве занимаемого объема можно записать как  $dQ = VdP$ .

Если это изменение происходит во времени  $t$ , то поток газа, необходимый для изменения давления на  $dP$  в сосуде объемом  $V$

$$J = \frac{dQ}{dt} = V \left( \frac{dP}{dt} \right)_{V=\text{const}} . \quad (8.9)$$

При постоянном изменении давления во времени поток газа определяется выражением:

$$J = \frac{dQ}{dt} = V \frac{\Delta P}{\Delta t} , \quad (8.10)$$

где  $\Delta P$  – изменение давления за время  $\Delta t$ .

Поток газа в системе измерения СИ измеряется в  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$  или в ваттах Вт. Однозначность этих единиц вытекает из простейших преобразований: поскольку  $\text{Па} = \text{Н} / \text{м}^2$ , то  $\text{м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с} = \text{Дж} / \text{с} = \text{Вт}$ .

Физический смысл измерения потока в единицах мощности состоит в том, что произведение давления на объем есть энергия, запасенная в газе, а изменение энергии во времени – мощность.

В отечественной и зарубежной литературе и практике используются различные внесистемные единицы измерения газовых потоков (таблица 8.6).

Таблица 8.6 – Коэффициенты для пересчета потоков газа, выраженных в различных единицах

Единица	$\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} = \text{Вт}$	$\frac{\text{л} \cdot \text{мм рт. ст}}{\text{с}}$	$\frac{\text{л} \cdot \text{ммк рт. ст}}{\text{с}}$	$\frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}}$
$\frac{\text{м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{с}} = \text{Вт}$	1	7,5	$7,6 \cdot 10^3$	10
$\frac{\text{л} \cdot \text{мм рт. ст}}{\text{с}}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	1	$10^3$	1,33
$\frac{\text{л} \cdot \text{ммк рт. ст}}{\text{с}}$	$1,33 \cdot 10^{-4}$	$10^{-3}$	1	$1,33 \cdot 10^{-3}$
$\frac{\text{л} \cdot \text{мбар}}{\text{с}}$	$10^{-1}$	$7,5 \cdot 10^{-1}$	760	1

В зависимости от направленности потока газа в технике течеискания различают понятия *натекания* и *утечки*.

*Натекание* – проникновение вещества через течи внутрь герметизированного изделия под действием перепада полного или парциального давления.

*Утечка* – проникновение вещества из герметизированного изделия через течи под действием перепада полного или парциального давления.

Натекание и утечка оцениваются потоком газа и имеют его размерность.

В технике течеискания в зависимости от назначения объекта, его конструкции, этапа технологического процесса и условий его проведения различают *контроль герметичности* и *испытание на герметичность*.

*Контроль герметичности* – технический контроль с целью установления соответствия изделия норме герметичности.

*Испытания на герметичность* – испытания с целью оценки характеристик герметичности изделия как результата воздействия на него при его функционировании или при моделировании воздействий на него.

В процессе испытаний изделий на герметичность используют *пробные, индикаторные* и *балластные* вещества.

*Пробное вещество* – вещество, проникновение которого через течь обнаруживается при течеискании (таблица 8.7).

*Индикаторное вещество* – вещество, в результате взаимодействия которого с пробным веществом формируется сигнал о наличии течи.

*Балластное вещество* – вещество, используемое для повышения полного давления с целью увеличения расхода пробного вещества через течь.

В качестве пробных веществ используются, как правило, газы с малой молекулярной массой, с низким их содержанием в атмосферном воздухе, с низкой сорбционной способностью, не токсичные, пожаробезопасные. В ряде случаев роль пробного вещества выполняет рабочее вещество, заполняющее герметизированный объект при эксплуатации или хранении,

например, фреон в холодильных агрегатах. Рабочее вещество в сочетании с пробным иногда может усилить эффект индикации. В других случаях ТУ на изделия не допускают контакта рабочего вещества с пробным, и тогда процесс испытаний таких изделий усложняется.

Таблица 8.7 – Газы, используемые как пробные вещества

Газ (обозначение)	Масса молекулы, $10^{-24}$ г	Молекулярная масса (округлено)	Диаметр молекулы, $10^{-6}$ мм	Коэффициент динамической вязкости, $10^7$ Па·с
Гелий (He)	6,6	4	0,218	198,6
Аргон (Ar)	66,3	40	0,367	221,6
Водород (H <sub>2</sub> )	32,5	2	0,275	89,2
Воздух	48,1	29	0,374	184,5
Фреон-12 (CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	200,8	121	0,174	122,0
Фреон-22 (CHF <sub>2</sub> Cl)	143,6	86	0,106	126,8
Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )	73,1	44	0,465	149,6
Элегаз (SF <sub>6</sub> )	242,5	140	0,166	–
Кислород (O <sub>2</sub> )	53,1	32	0,364	205,9
Закись азота (N <sub>2</sub> O)	73,1	44	0,118	0,160

*Контрольная среда* – среда, содержащая установленное количество пробного вещества. Она, как правило, представляет собой смесь пробного вещества с балластным или рабочим.

*Рабочее вещество* – вещество, заполняющее герметизированное изделие при эксплуатации или хранении.

*Чувствительность течеискания* – наименьший поток пробного вещества через неплотность, который может быть обнаружен и измерен при течеискании. Она зависит от пороговой чувствительности течеискателя, скорости перемещения рабочего органа течеискателя и расстояния от его поверхности до контролируемого изделия, физических свойств и концентрации рабочего и индикаторного веществ, рабочих и испытательных давлений в изделии.

При контроле герметичности изделий и объектов применяют различную аппаратуру и оборудование. Основным прибором для аппаратурных методов течеискания является *течеискатель* – прибор или устройство для обнаружения течей. В настоящее время используют различные течеискатели, отличающиеся областью применения, принципом действия, габаритными размерами, чувствительностью.

*Чувствительность течеискателя* – отношение изменения сигнала течеискателя к вызывающему его изменению расхода пробного вещества через течи. *Порог чувствительности течеискателя* – наименьший расход пробного вещества или наименьшее изменение давления, регистрируемые течеискателем.

Для определения чувствительности течеискателя и оценки регистрируемых течей или суммарной негерметичности изделий применяют калиброванные течи.

*Калиброванная течь* – устройство, воспроизводящее определённый расход вещества через течь.

### 8.2.1 Причины нарушения герметичности

Нарушения герметичности изделий и объектов связаны с наличием сквозных дефектов в отдельных узлах или местах их сочленения. Дефекты могут образовываться как в процессе производства конструкционных материалов, так и при изготовлении отдельных деталей и изделия в целом (сборке), а также при его эксплуатации.

Дефекты изделий и объектов, являющиеся причиной утечки или натекания газовых, или жидких сред, могут быть разделены на четыре группы:

- 1) возникшие в процессе первичного производства сырья, материалов, металлов и т. д.;
- 2) внесенные при обработке материалов и изделий;
- 3) разъемных соединений;
- 4) эксплуатационные.

Помимо приведенных причин образования дефектов нарушение герметичности изделий и объектов может происходить вследствие проницаемости материалов, из которых изготавливаются эти изделия. При этом разные газы по-разному проникают в различные материалы. Например, проницаемость сталей для водорода возрастает с ростом содержания в них углерода. Только серебро пропускает кислород. Коэффициент проницаемости веществ с кристаллической структурой (металлы) существенно ниже, чем веществ с неупорядоченной структурой (стекла, резины и т. п.). Например, проницаемость стекол оказывается тем больше, чем больше в их составе содержание стеклообразующих веществ типа SiO. По-видимому, в неупорядоченной структуре больше «дыр», через которые могут проникнуть частицы газа, в то время как через малые зазоры кристаллической решетки они пройти не в состоянии. Это предположение подтверждается изменением проницаемости в зависимости от размера молекул газа.

Через течи газ обычно проникает гораздо быстрее, чем через основной материал. Поэтому в производственном контроле изделий невозможно одновременно обнаружить оба вида нарушения герметичности. **Задачей техники течеискания является только обнаружение течей**, поскольку проницаемость как свойство материала должна исключаться правильным его выбором при конструировании изделия.

### 8.2.2 Классификация методов испытания на герметичность

Методы течеискания весьма разнообразны и существенно различаются по чувствительности, избирательной реакции на пробное вещество, принципам обнаружения утечки этого вещества, по виду используемых при реализации метода пробных веществ и т. д.

**Классификация методов.** Контроль герметичности (течеискание) относится к виду НК, основанному на обнаружении пробного вещества, проникающего через течь [7, 8, 68, 69].

Методы течеискания предназначены для оценки степени негерметичности объекта контроля и его основных частей, а также для локализации течей как в основном материале, так и в соединениях различного типа (сварных, паяных, разъемных и т. п.). Методы течеискания применяют при изготовлении, эксплуатации и ремонте герметизированных объектов.

ГОСТ 24054–80 [70] устанавливает классификацию методов течеискания по первичному информативному параметру, способу получения первичной информации и способу реализации методов.

По *первичному* информативному параметру методы течеискания подразделяют на *газовые* и *жидкостные*, т. е. первичным признаком классификации является агрегатное состояние контрольного (пробного) вещества, проникающего через течь (газ или жидкость).

По вторичному признаку классификации, способу получения первичной информации при обнаружении пробного вещества, проникающего через течь, т. е. принципиальной основе метода течеискания различают:

- *масс-спектрометрический метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа путем разделения ионов различных газов по отношению их массы к заряду в электрическом и магнитном полях;

- *галогенный метод* – регистрация проникшего через течи пробного вещества по увеличению эмиссии положительных ионов с накаливаемой металлической (платиновой) поверхности при попадании на нее галогеносодержащих веществ;

- *катарометрический метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа за счет отличия его теплопроводности от теплопроводности воздуха;

- *электрозахватный метод* – регистрация проникшего через течи электроотрицательного пробного газа по изменению электропроводимости разрядного промежутка детектора;

- *плазменный метод* – регистрация проникшего через течи электроотрицательного пробного газа по изменению частоты срывов колебаний высокочастотного генератора;

- *манометрический метод* – регистрация изменения давления, обусловленного утечкой пробного газа через течи;

- *вакуумметрический метод* – регистрация изменения давления, обусловленного натеканием пробного газа или пробной жидкости через течи;

- *пузырьковый метод* – регистрация пузырьков пробного газа, проникшего через течи, в жидкости или индикаторном покрытии; *акустический метод* – регистрация акустических волн, возбуждаемых при истечении газов через течи;

- *химический метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа или жидкости по эффекту цветных химических реакций с индикаторным покрытием;



– *яркостный (ахроматический) метод* – регистрация контраста ахроматического следа, образуемого в местах течей контрольной средой (пробной жидкостью) на фоне поверхности контролируемого объекта в видимом свете;

– *цветной (хроматический) метод* – регистрация проникающей через течи контрольной среды (пробной жидкости) по изменению цвета индикаторного покрытия за счет его растворения.

– *люминесцентный метод* – регистрация контраста люминесцирующего следа, образуемого пробным веществом (жидкостью) в месте течи на фоне поверхности контролируемого объекта при УФ-облучении поверхности.

– *инфракрасный метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа путем избирательного поглощения ИК-излучения пробным газом;

– *звукорезонансный метод* – регистрация проникшего через течи пробного газа за счет отличия в нем скорости звука и коэффициента затухания амплитуды звуковой волны от воздуха;

– *радиоактивный метод* – регистрация проникшего через течи радиоактивного пробного газа или жидкости по интенсивности его излучения;

– *искровой метод* – регистрация мест течи по изменению цвета свечении безэлектродного высокочастотного разряда;

– *акустический метод* – регистрация акустических волн, возбуждаемых при истечении газов через течи;

– *фотоионизационный метод* – регистрация паров органических пробных сред, проникших через течи, путем ионизации молекул пробной среды под воздействием УФ-излучения;

– *метод полупроводниковых твердотельных сенсоров* – регистрация проникшего через течи пробного вещества по изменению одной из характеристик (проводимости, порогового напряжения и т.п.) полупроводника, легированного различными соединениями;

Наименование *способов реализации* наиболее широко применяемых в производстве методов течеискания, их пороговая чувствительность, а также используемые пробные вещества приведены в таблице 8.8.

Все известные методы течеискания можно разбить на три большие группы.

1 *Компрессионные безаппаратурные методы* предусматривают заполнение под избыточным давлением испытуемых объектов газом или жидкостью, истечение которых регистрируется при испытаниях. При этом, как правило, проводится качественная оценка негерметичности (падение давления, пузырьки газа в жидкости, количество течей) и только для отдельных методов применяются косвенные, приблизительные методы количественной оценки герметичности. Методы этой группы имеют низкую чувствительность:  $\sim 10^{-2}-10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$ , но, как правило, не требуют сложного технологического оснащения и оборудования, отличаются простотой выполнения при незначительных затратах труда.

2 *Газоаналитические методы* предусматривают заполнение объектов пробным веществом (гелий, фреон и т. п.) и отбор проб в местах контроля; вакуумирование испытуемого объекта с обдувом контролируемой поверхности

пробным веществом; помещение испытуемого объекта в испытательную камеру с созданием внутри его избыточного давления или вакуума с последующим отбором проб соответственно из камеры или объекта. Эта группа методов, как правило, позволяет проводить количественную оценку герметичности посредством специальных устройств - газоанализаторов (течеискателей). Методы газоаналитической группы обладают высокой чувствительностью  $\sim 10^{-8}$ – $10^{-13}$  м<sup>3</sup>·Па/с, но при этом требуют сложного технологического оснащения и значительных затрат труда.

3 *Физико-химические методы* сочетают компрессионные методы с использованием химически активных пробных сред. При этом испытуемые объекты заполняются химически активными пробными средами либо рабочими (технологическими) средами, оценка герметичности осуществляется посредством специальных индикаторных средств (пенный индикатор, дисперсная масса, индикаторные ленты и т. д.). Чувствительность этой группы методов  $\sim 10^{-6}$ – $10^{-7}$  м<sup>3</sup>·Па/с. Данные методы наряду с довольно высокой чувствительностью обладают возможностью в ряде случаев количественной оценки и не требуют сложного технологического оснащения и больших затрат труда.

Таблица 8.8 – Классификация методов течеискания

Метод		Способ реализации метода	Порог чувствительности, м <sup>3</sup> ·Па/с
по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации		
Газовый	Масс-спектрометрический	Вакуумных камер (вакуумирования)	$6,7 \cdot 10^{-13}$
		Гелиевых камер	по гелию
		Накопления при атмосферном давлении	$8,0 \cdot 10^{-9}$
		Накопления в вакууме	по гелию
		Вакуумных присосок, местных вакуумных камер	$1,3 \cdot 10^{-14}$
		Обдува	$1,3 \cdot 10^{-10}$
	Щупа	$6,7 \cdot 10^{-11}$	
		по гелию	$1,3 \cdot 10^{-19}$
	Галогенный	Щупа	$1,3 \cdot 10^{-7}$
			по фреону-12
	Галогенный	Обдува	$1,3 \cdot 10^{-8}$
		Вакуумных камер (вакуумирования)	по фреону-12
	Электронзахватный	Щупа	$6,7 \cdot 10^{-10}$
	Плазменный	Накопления при атмосферном давлении	по элегазу

Окончание таблицы 8.8

Метод		Способ реализации метода	Порог чувствительности, м <sup>3</sup> ·Па/с
по первичному информативному параметру	по способу получения первичной информации		
Газовый	Манометрический	Бескамерный	$1,3 \cdot 10^{-3}$ по воздуху
	Вакуумметрический	Камерный (повышения давления в барокамере)	$1,3 \cdot 10^{-6}$ по воздуху
	Катарометрический	Щупа	$2 \cdot 10^{-6}$ по гелию
	Звуко-резонансный		$2 \cdot 10^{-6}$ по гелию
	Акустический		$7 \cdot 10^{-3}$ по воздуху
	Пузырьковый	Опрессовки с погружением в жидкость (аквариума)	$1,3 \cdot 10^{-6}$ по воздуху
		Опрессовки с пенным индикатором (дисперсной массой)	$1,3 \cdot 10^{-7}$ по воздуху
		Вакуумно-пузырьковый	$5 \cdot 10^{-7}$ по воздуху
		Бароаквариума	$6,7 \cdot 10^{-7}$ по воздуху во фреоне-113 (C <sub>2</sub> F <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> )
	Химический	Опрессовки с индикаторным покрытием (лентой)	$1,3 \cdot 10^{-8}$ по аммиаку
Жидкостный	Химический	Хемосорбционный	$1,3 \cdot 10^{-7}$ по аммиаку
		Проникающих жидкостей	$1,3 \cdot 10^{-7}$ по воде с добавками пробных веществ
	Яркостный (ахроматический)	Опрессовки (гидравлический)	$1,3 \cdot 10^{-5}$ по воде
		Капиллярный (керосиновой пробы)	$1,3 \cdot 10^{-6}$ по керосину
	Цветной (хроматический)	Сольватный	$1,3 \cdot 10^{-7}$ по керосину
	Люминесцентный	Опрессовки (люминесцентно-гидравлический)	$1,3 \cdot 10^{-6}$ по воде с добавками пробных веществ
		Капиллярный	по воде с добавками пробных веществ

### 8.2.3 Общая характеристика технологического процесса испытаний на герметичность

Контроль герметичности и испытания на герметичность проводят при изготовлении, эксплуатации и ремонте герметизированных объектов.

Испытания на герметичность целесообразно проводить в три этапа:

- 1) определение степени герметичности объекта в целях проверки его соответствия техническим требованиям;
- 2) выявление негерметичных элементов объекта для локализации течей;
- 3) поиск мест течей и их устранение.

Если на первом этапе натекание или утечка не зафиксированы, то можно утверждать, что испытуемый объект герметичен в пределах пороговой чувствительности проведенных испытаний. При установлении факта негерметичности объекта приступают ко второму этапу испытаний, который позволяет существенно сократить наиболее трудоемкую часть испытаний – поиск течей. Выявление негерметичного элемента является более сложной задачей и ее должны выполнять высококвалифицированные специалисты, а поиск течей в конкретном элементе может вести оператор более низкой квалификации.

Технологический процесс испытаний в общем виде представляет собой сложную техническую систему: объект испытаний – контрольная среда (пробное вещество) – индикаторное средство – испытательное оборудование, которое включает в себя ряд отдельных процессов: подготовку объекта к испытаниям заполнение его контрольной средой (пробным веществом) или вакуумирование, транспортировку пробного вещества от дефекта до индикатора, регистрации параметров испытания.

Следует отметить, что испытания на герметичность крупногабаритных объектов – ответственная и опасная операция, от правильной организации которой и соблюдения мер предосторожности зависит не только качество изделия, но и безопасность персонала, проводящего испытания [71]. Наиболее полно содержание технологического процесса испытаний на герметичность описывает типовая структурная схема, представленная на рисунке 8.13. В зависимости от габаритных размеров объекта испытаний и других специфических особенностей те или иные процессы могут заменяться другими или не проводиться вообще в соответствии с принятой технологией их изготовления.

**Объект испытания на герметичность** должен быть изготовлен в соответствии с требованиями технической документации, пройти испытания на прочность быть принят службами контроля и иметь соответствующую сопроводительную документацию.

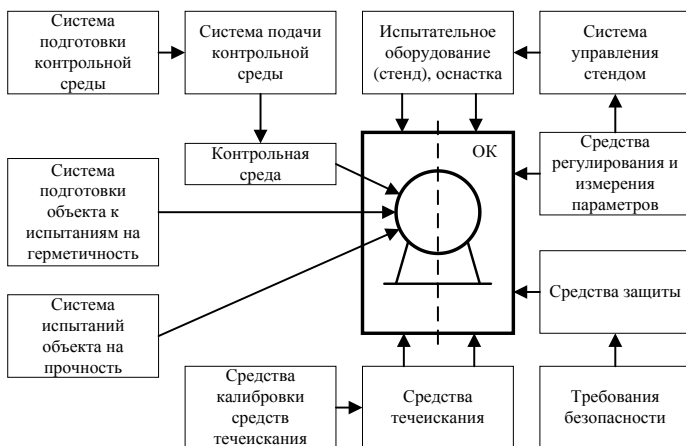


Рисунок 8.13 – Типовая структурная схема технологического процесса испытаний на герметичность

Необходимым условием для выявления микродефекта при испытаниях является его полная очистка от механических и органических загрязнений, которыми микродефект может закупориться в процессе предшествующих операций: штамповки, механической обработки, гидроиспытаний на прочность. По этой причине испытания на герметичность рекомендуется проводить до нанесения лакокрасочных и декоративных покрытий, кроме случаев, специально оговоренных в технической документации. Поверхность и соединения элементов и узлов объекта, подлежащие испытаниям на герметичность, должны предварительно пройти подготовку: очистку, обезжиривание, сушку, при которых удаляются различные виды загрязнений, следы моющей жидкости и влаги с внутренних и наружных поверхностей и из возможных микронеплотностей.

Методы и режимы очистки, обезжиривания, сушки внутренних и наружных поверхностей объекта устанавливаются исходя из конструктивных особенностей объекта и осуществляются в соответствии с НТД на подготовку и сушку объектов.

Следует иметь в виду, что микродефекты могут закупориваться атмосферной влагой, причем это перекрытие ненадежно: течи, не обнаруженные во время испытаний на герметичность, могут вскрыться в непредсказуемый момент времени. Поэтому срок хранения объекта или изделия после сушки или сборки до испытаний ограничивается. Этот срок оговаривается в НТД.

**Контрольная среда.** В процессе испытаний используются пробное вещество, балластное и рабочее вещества, которые по физическому состоянию могут быть газами или жидкостями.

В качестве пробных веществ применяют гелий, аргон, азот, фреон, элегаз, аммиак, водород и др.; как контрольную среду – смесь указанных газов с балластным веществом (воздухом, азотом), водные растворы бихромата калия или натрия с технологическими добавками и др. Нередко в качестве пробного вещества используется воздух, например, при пузырьковом и акустическом методах. Они должны хорошо проникать через течи и обнаруживаться средствами течеискания, быть недорогими, не оказывать вредного воздействия на обслуживающий персонал и объекты контроля.

Этиловый спирт, фреоны, изоктан, ацетон, вода, топливо и масла могут служить рабочими веществами, индикация которых возможна при испытаниях.

Концентрация пробного вещества в контрольной среде определяется из условий:

- обеспечения допустимой нормы герметичности объекта;
- отсутствия воздействия пробного вещества на конструкцию в целом или на отдельные ее элементы (например, влияние гелия на радиоэлектронную аппаратуру, аммиака – на медные включения);
- снижения материальных затрат на пробные вещества, стоимость которых значительно выше стоимости балластного вещества.

Пробное вещество выбирается в зависимости от метода испытания и величины испытательного давления, конструкции изделия, его назначения и нормы герметичности. Так, при контроле герметичности электровакуумных изделий требования высокой и сверхвысокой чувствительности выполняются применением масс-спектрометрического метода с использованием гелия в качестве пробного вещества.

При способах испытаний, предусматривающих регистрацию утечек, пробное вещество или контрольная среда вводится во внутреннюю полость объекта.

Заполнение объекта контрольной средой может осуществляться:

- отдельной подачей пробного и балластного веществ;
- подачей предварительно приготовленной смеси пробного и балластного веществ.

Заполнение объекта контрольной средой с отдельной подачей веществ рекомендуется проводить, когда:

- из-за конструктивных соображений недопустимо вакуумировать внутреннюю полость объекта;
- объект не имеет сложной внутренней поверхности и разветвлённой системы трубопроводов, в связи с чем не требуется длительной выдержки для образования равномерной концентрации пробного вещества по всему объёму;
- во внутренней полости объекта предусмотрена возможность установки вентилятора для ускорения образования равномерной концентрации пробного вещества в объёме объекта.

Время выдержки объекта до образования равномерной концентрации пробного вещества по объёму объекта определяется измерением концентрации пробного вещества на входе в объект и в наиболее удалённой точке от входа в него. Процесс образования равномерной смеси считают законченным, если величины концентраций пробного вещества во всех точках измерения отличаются друг от друга и от заданной в технической документации не более чем на 10 %.

При способах, предусматривающих регистрацию натекания, испытания, как правило, проводят при вакуумировании объекта. Пробное вещество или контрольную среду подают путём обдува объекта или посредством чехлов и камер.

**Система подачи контрольной среды в объект испытаний.** Для подачи контрольной среды в объект испытаний возможно использование различных устройств, способных обеспечить в объекте необходимое давление. К ним относятся компрессоры, баллоны и ёмкости высокого давления, смесительные установки, гидро- и вакуумные насосы.

Система подготовки контрольной среды. Заполнение объектов предварительно подготовленной контрольной средой с применением смесительных устройств рекомендуется проводить в случае, когда возможно предварительное вакуумирование внутренней полости объекта или при испытаниях объекта в вакуумной камере при значительных испытательных давлениях ( $p = 10$  МПа и более), когда содержащимся в объекте атмосферным воздухом можно пренебречь.

**Испытательное оборудование, оснастка.** В зависимости от объекта испытаний и способа может применяться различное испытательное оборудование, а в ряде случаев объект испытания подсоединяется непосредственно к теческателью. Испытательным считается оборудование, обеспечивающее соблюдение технологических условий проведения испытаний. Это, например, вакуумные установки, вакуумные насосы, пневмогидростенды, пневмогидроэлектрорупульты сушильные установки и т. п.

К оборудованию предъявляются особые требования. Так, оно должно соответствовать чертежам, иметь паспорт, инструкцию по эксплуатации и отвечать требованиям Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением.

Для обеспечения нормальных условий эксплуатации оборудование (испытательные стенды) должно быть снабжено:

- приборами для измерения давления;
- предохранительными устройствами;
- запорной арматурой;
- указателями уровня жидкости и др.

Рабочие полости испытательного оборудования – барокамер, стендов, сушильных камер и т. п. – должны содержаться в чистоте и проходить профилактическую обработку.

Применяемая при испытаниях оснастка не должна иметь:

- трещин, надрывов, повреждений, заусенцев;
- срыва граней под ключ;
- повреждённой резьбы;
- грязи, ржавчины, стружки; нарушения уплотнительных прокладок;
- нарушения антикоррозионных покрытий;
- какой-либо доработки без отметки в паспорте оснастки.

Трубопроводы, подводящие жидкость или газ, должны быть изготовлены из коррозионностойких сталей и снабжены фильтрами на выходе.

**Средства течеискания и калибровки.** Обнаружение течей осуществляется с помощью индикаторных средств и течеискателей.

Применяемые индикаторные средства должны обеспечивать следующие возможности:

- обнаружения цветной химической реакции;
- растворения красителей;
- механической деформации пленок;
- люминесценции.

Индикаторные средства могут применяться в виде суспензий, порошка, лент (на бумажной и тканевой основах).

При контроле герметичности аппаратурными методами, регистрация течей осуществляется в большинстве случаев течеискателями, отличающихся принципами обнаружения течей. К наиболее распространённым течеискателям относятся [72–75]:

- масс-спектрометрический, действие которого основано на обнаружении пробного вещества путём разделения ионов газа по отношению их массы к заряду;
- галогенный, базирующийся на выявлении галогеносодержащего пробного вещества по увеличению эмиссии положительных ионов нагретой металлической поверхностью;
- электронозахватный, действующий на принципах ионизации газов в камере и обнаружения электроотрицательных пробных веществ, склонных к образованию отрицательных ионов;
- плазменный, действие которого основано на обнаружении электроотрицательных пробных веществ по изменению частоты срыва колебаний высокочастотного генератора;
- катарметрический, основанный на регистрации изменения теплопроводности газовой среды в результате поступления в неё пробного вещества;
- звукорезонансный, регистрирующий изменения скорости звука и коэффициента затухания в газовой среде в результате поступления в неё пробного вещества;
- акустический, действие которого основано на регистрации УЗ-колебаний.



На практике хорошо зарекомендовали себя простые мобильные методы течеискания, не требующие использования дорогостоящего оборудования и применимые также в полевых условиях [76]. К ним относится пузырьковый метод, сущность которого заключается в регистрации локальных утечек в объекте по появлению пузырьков контрольного газа в индикаторной жидкости или на индикаторном покрытии. Метод применяется для контроля герметичности ёмкостей, гидравлических и газовых систем, находящихся под избыточным давлением.

Так, для выявления дефектов, выходящих на поверхность контролируемой конструкции, типа разрыва сплошности металла конструкции (сквозные трещины, свищи и т. п.), различного вида сварных соединений и основного металла изделий (полуфабрикатов, деталей и т. п.) из стали, чугуна, цветных лёгких и специальных сплавов металлических конструкций инженерных сооружений, технических, технологических систем, выполненных всеми видами сварки, используются вакуум-рамки (рисунок 8.14) [77].

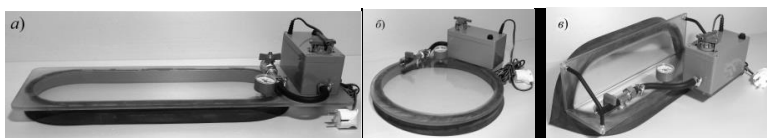


Рисунок 8.14 – Разновидности вакуум-рамки  
 а – плоская прямоугольная; б – плоская круглая; в – угловая

Для настройки средств течеискания, оценки их чувствительности и результатов испытаний используется их калибровка с помощью *контрольных течей*, предназначенных для создания стабильного потока контрольного газа и *контрольных концентраций пробного вещества*.

### Контрольные вопросы

- 1 На каких физических принципах основан капиллярный контроль?
- 2 Каковы основные достоинства и недостатки капиллярного контроля по сравнению с другими методами НК?
- 3 Какие основные технологические операции применяются в капиллярном контроле.
- 4 Чем характеризуется чувствительность капиллярного контроля?
- 5 Какие классы чувствительности установлены для капиллярного контроля и какие пределы раскрытия выявляемых дефектов им соответствуют?
- 6 Какие требования необходимо выполнять для достижения максимальной чувствительности капиллярного контроля?
- 7 Какие существуют разновидности методов капиллярного контроля?
- 8 На чём основан цветной метод капиллярного контроля, каковы его чувствительность и особенности?

9 На чём основан люминесцентный метод капиллярного контроля, каковы его чувствительность и особенности?

10 На чём основан люминесцентно-цветной метод капиллярного контроля, каковы его чувствительность и особенности?

11 На чём основан яростный метод капиллярного контроля, каковы его чувствительность и особенности?

12 На чём основан метод фильтрующихся суспензий капиллярного контроля, каковы его чувствительность и особенности?

13 Какова цель проведения операции подготовки объекта к капиллярному контролю?

14 Какова цель проведения операции нанесения пенетранта на контролируемую поверхность?

15 Зачем удаляются излишки пенетранта с контролируемой поверхности?

16 Какова цель нанесения проявителя на контролируемую поверхность?

17 Какое влияние оказывает освещенность контролируемой поверхности на выявляемость дефектов?

18 Каков порядок оформления результатов капиллярного контроля?

19 Какая освещенность контролируемой поверхности требуется для различных классов чувствительности люминесцентного метода капиллярного контроля?

20 Какая освещенность контролируемой поверхности требуется для различных классов чувствительности цветного и яркостного методов капиллярного контроля?

21 По каким признакам подразделяются дефекты, выявленные капиллярным контролем?

22 В каких отраслях промышленности применяются капиллярные методы контроля?

23 Изделия из каких материалов могут контролироваться капиллярными методами?

24 Изделия каких форм и размеров могут контролироваться капиллярными методами?

25 Что такое герметичность?

26 Что такое поток газообразного или жидкого вещества?

27 Что такое течь?

28 Чем отличаются натекание и утечка?

29 Что понимается под понятием рабочего вещества?

30 Что понимается под понятием пробного вещества?

31 Что понимается под понятием балластного вещества?

32 Что понимается под чувствительностью течеискания?

33 Какие пробные вещества применяются в течеискании?

34 Каковы технические средства, используемые при течеискании?

35 По каким признакам классифицируются методы течеискания?

36 Какова сущность масс-спектрометрического метода контроля?

37 Какова сущность манометрического метода контроля?

38 Какова сущность пузырькового метода контроля?

39 Какова сущность галогенного метода контроля?

40 Какие объекты контролируются методом течеискания?

41 Какие виды дефектов выявляются при контроле герметичности?

## 9 ТЕПЛОВОЙ ВИД НК

---

### 9.1 Физические основы теплового НК

Исследования показывают, что эффективно проводить оценку качества, безопасности, надежности и безопасности эксплуатации большого класса материалов, изделий и конструкций в различных отраслях промышленности можно путем анализа их **температурных полей**. Это обусловлено тем, что функционирование многих объектов связано с температурными нагрузками, при этом их внутренняя структура оказывает заметное воздействие на характер излучаемого поля, что позволяет по анализу его аномалий судить об изменении свойств материала, его ТФХ в целом либо отдельных зон.

**Общие сведения.** В методах теплового неразрушающего контроля (ТНК) используется тепловая энергия, распространяющаяся в ОК. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, который, в свою очередь, зависит от конструкции и материалов объекта, технологии его функционирования и наличия дефектов [78].

Под **дефектом** понимается несоответствие продукции требованиям НТД, проявляющееся в виде **локального температурного перепада** на поверхности контролируемого объекта вследствие различных теплофизических свойств качественных и дефектных участков объекта.

Это обстоятельство позволяет применять тепловые методы для контроля широкого спектра изделий и материалов как металлических, так и неметаллических или включающих те и другие слои.

Объектами ТНК являются изделия, в которых имеются следующие дефекты: трещины, пустоты, поры, раковины, места непровара, непроварки, плохой тепло-, гидро- и электроизоляции, неоднородности состава, посторонние примеси, изменение геометрических размеров, места термического и усталостного перенапряжения и пр.

В зависимости от назначения и области применения ТНК разделяют на *тепловую дефектоскопию, бесконтактную пирометрию и тепловидение*.

Методы **тепловой дефектоскопии** предусматривают качественный контроль тепловой неоднородности контролируемых объектов.

Методы **бесконтактной пирометрии** используют для количественного измерения температуры различных объектов и процессов.

**Тепловидение** – это интенсивно развивающееся направление в технике ТНК, использующее различные средства визуализации тепловых полей и изображений. Тепловизионные системы могут быть использованы для целей как тепловой дефектоскопии, так и бесконтактной пирометрии.

## 9.2 Классификация и модели тепловой дефектоскопии

В основе всех тепловых методов дефектоскопии лежит связь между тепловым потоком от объекта и неоднородностью температурного распределения на его поверхности, возникающей при наличии дефектов в исследуемом объекте.

Согласно нормативным документам [79, 80] различают *пассивный* и *активный* способы тепловой дефектоскопии в зависимости от наличия или отсутствия внешнего источника энергии.

**Активные способы** ТНК – способы ТК, при которых ОК подвергается нагреву или охлаждению внешним источником.

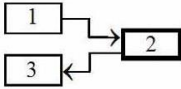
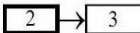
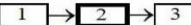
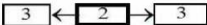
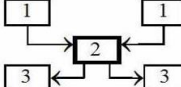
Активные способы предназначены для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности, изменений в структуре и физико-химических свойствах объектов. Такие дефекты обычно называют *пассивными*, т. е. не выделяющими тепла.

**Пассивные способы** ТНК – способы ТК, при которых ОК не подвергается воздействию внешнего источника (регистрация собственного теплового излучения). Пассивные способы пригодны для контроля тепловых режимов и обнаружения *активных* дефектов, т. е. наиболее интенсивно выделяющих тепловую энергию.

В зависимости от взаимного расположения источника нагрева, термочувствительного элемента и объекта контроля, а также последовательности контрольных операций различают односторонний, двухсторонний, комбинированный (таблица 9.1), синхронный и несинхронный способы теплового НК. Кроме этого, способы теплового НК делят на статические и динамические. В этом случае определяющим фактором является зависимость температуры объекта от времени.

В задачах ТНК обычно исследуют поверхностные температурные поля объектов. Определение внутренних температур, как правило, затруднительно из-за непрозрачности объектов для ИК-излучения. Однако внутренние температурные неоднородности, характеризующие дефектность изделий, можно определить в численном виде с помощью моделирования их на компьютере.

Таблица 9.1 – Классификация способов теплового контроля

Способ контроля	Схема контроля	
	активный	пассивный
Односторонний		
Двухсторонний		
Комбинированный		–

*Примечание* – 1 – источник нагрева; 2 – объект контроля; 3 – термочувствительный элемент.

Наличие дефектов приводит к локальному или интегральному искажению температурного поля, характерного для данного изделия. Это выражается в появлении перепадов температуры. Пространственно-временная функция этих перепадов определяется температурой тела, условиями его теплообмена с окружающей средой, геометрическими и теплофизическими характеристиками объекта контроля и самих дефектов, а также временем в динамическом режиме.

Модель *активного теплового контроля* при обнаружении пассивных дефектов представлена на рисунке 9.1.

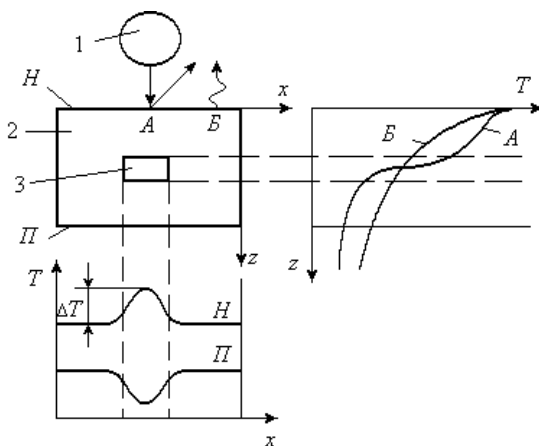


Рисунок 9.1 – Модель активного теплового контроля пассивных дефектов:  
 1 – источник энергии; 2 – контролируемый объект; 3 – дефект; А – точка локального нагрева;  
 Б – излучающая точка нагреваемой поверхности; X – направление сканирования  
 источника энергии с локальным воздействием; H – нагреваемая поверхность;  
 Z – направление вглубь образца; II – противоположная поверхность; T – температура

**Активный контроль** предусматривает наличие источника энергии, которым обычно являются лазерный пучок света, электронный луч или какой-либо другой источник с подвижным локальным воздействием в случае синхронного контроля или интегральный источник (ИК-лампа, электроплитка) для несинхронного контроля.

Внутренний дефект в многослойном изделии оказывает значительное сопротивление тепловому потоку, который распространяясь в глубь изделия обтекает дефект по окружающим слоям основного материала. При этом имеет место накопление тепла в слое до дефекта и его недостаток в слое за ним, что проявляется в локальном повышении температуры на нагреваемой поверхности «Н» и понижении на противоположной нагреву поверхности «П». Иногда говорят, что дефект отражает тепловой поток на поверхность Н и затеняет его на поверхности П.

Существуют следующие способы активного теплового НК [81]:

1 Кратковременный локальный нагрев изделия с последующей регистрацией температуры той же (при одностороннем контроле) или противоположной области (при двустороннем контроле). По истечении некоторого времени (чтобы изделие успело остыть) переходят к следующей точке и т. д. Так будет пройдена вся поверхность изделия, причем измеренная температура дефектных областей будет существенно отличаться от температуры бездефектных участков.

2 С использованием сканирующей системы, состоящей из жестко закрепленных друг относительно друга источника нагрева и регистрирующего прибора (например, радиометр), перемещающихся с постоянной скоростью вдоль поверхности образца.

3 Одновременный нагрев поверхности образца вдоль некоторой линии с последующей регистрацией температуры вдоль этой же линии (при одностороннем контроле) или вдоль аналогичной линии с противоположной поверхности образца (при двустороннем контроле).

4 Одновременный нагрев всей поверхности образца и последующая одновременная регистрация температурного распределения на этой же или на противоположной поверхности. Подобный способ контроля может быть осуществлен при помощи тепловизора.

Эффективность выявления дефектов каждым из описанных способов теплового НК уменьшается от первого к четвертому, а производительность – возрастает.

Примером **пассивного контроля** также являются ситуации, когда дефект в силу тех или иных причин сам по себе имеет аномальную по сравнению с основным материалом температуру, проявляясь на поверхности чаще всего в виде статического температурного перепада одного знака. В электронной технике такая модель используется для дефектов типа пробоя, короткого замыкания, обрыва, изменения номинала или энергетического ре-

жима, утечки тока или тепла, а также при выходе из строя отдельных элементов (резисторов, транзисторов, интегральных схем и т. п.).

В пассивном тепловом контроле при обнаружении активных дефектов (рисунок 9.2) температура объекта вследствие определённых технологических или функциональных причин превышает температуру окружающей среды, и обнаружение дефекта возможно из-за интегрального различия теплофизических характеристик в месте дефекта и вне его.

Как правило, в этом случае более эффективен динамический режим контроля, поскольку при статическом режиме значительны эффекты растекания тепла вокруг дефекта.

Координаты места температурного перепада, его рельеф или, иными словами, топология температурного поля и его величина в градусах являются функцией большого количества факторов.

Эти факторы можно подразделить на внутренние и внешние.

*Внутренние* факторы определяются теплофизическими свойствами контролируемого объекта и дефекта, а также их геометрическими параметрами. Эти же факторы определяют временные параметры процесса теплопередачи, в основном, процесса развития температурного перепада.

*Внешними* факторами являются характеристики процесса теплообмена на поверхности объекта контроля (чаще всего величина коэффициента конвективной теплоотдачи), мощность источника нагрева и скорость его перемещения вдоль объекта контроля.

Основным информационным параметром при ТНК является **локальная разность температур**  $\Delta T$  между дефектной  $T_d$  и бездефектной  $T_{бд}$  областями объекта.

Знак перепада температур зависит от соотношения теплофизических свойств дефекта и материала ОК и исследуемой поверхности. При нагреве изделий, содержащих дефекты, плохо проводящие тепло (типа газовых включений), перепад **положителен** для поверхности, подвергнутой нагреву (т. е. место дефекта характеризуется локальным повышением температуры), и **отрицателен** для противоположной стороны. В случае дефекта, проводящего тепло лучше основного изделия (металлические вкрапления), знак перепада изменяется на обратный.

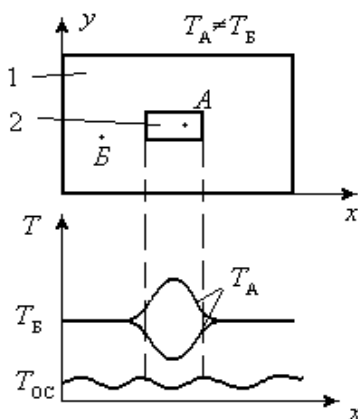


Рисунок 9.2 – Модель пассивного теплового контроля активных дефектов:

1 – контролируемый объект; 2 – дефект;  
 $XY$  – плоскость поверхности объекта;  
 $A$  и  $B$  – точки поверхности объекта

Временной ход перепада температур характеризуется кривой с максимумом. Это заставляет в каждом конкретном случае оптимальным образом выбирать момент регистрации температурного перепада  $t_m$ . Величина  $t_m$  зависит от тепло- и теплопроводности изделия и дефекта, и глубины залегания дефекта  $l$ . Момент наступления максимального перепада и глубина залегания дефекта обычно связаны линейной зависимостью, причем угол наклона соответствующей прямой зависит от теплофизических свойств изделия и дефекта. Чем более теплопроводно изделие, тем меньше величина  $t_m$ . В зависимости от типа материала и глубины залегания дефекта величина  $t_m$  для металлов колеблется от долей секунд до десятков секунд, для неметаллов она может составлять десятки минут.

Увеличение мощности нагревателя и уменьшение интенсивности теплообмена приводит к росту уровня нагрева изделия и лучшему выявлению дефектов.

В основе аналитического решения задач активного теплового контроля лежит уравнение теплопроводности.

Пусть, например, в ОК существует поле температур  $T(t, x, y, z)$ , зависящее от времени  $t$  и координат  $(x, y, z)$ . Компоненты системы могут двигаться со скоростью, составляющие которой по координатам равны  $W_x, W_y, W_z$ . Параметры сред постоянны. В пространстве расположены источники тепла, задающие плотность теплового потока  $q$ .

Процесс переноса тепла в среде за счет теплопроводности и конвекции характеризуется дифференциальным уравнением

$$a^2 \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \left( W_x \frac{\partial T}{\partial x} + W_y \frac{\partial T}{\partial y} + W_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{q}{c\rho} = 0, \quad (9.1)$$

где  $a$  – коэффициент теплопроводности, характеризующий скорость распространения температуры в пространстве ( $a = \lambda/c\rho$ ),  $m^2/c$ ;  $c$  – теплоемкость вещества, равная количеству тепловой энергии, необходимой для нагрева на 1 К единицы массы вещества, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, показывающий способность тел передавать теплоту, Вт/ $m^2$ ;  $\rho$  – плотность вещества, кг/ $m^3$ ;  $q$  – плотность теплового потока, Вт/ $m^2$ .

Области применения ТНК приведены в таблице 9.2.

Таблица 9.2 – Области применения ТНК

Область применения	Способ, объекты контроля, выявляемые дефекты
<b>Активный ТНК</b>	
Авиакосмическая индустрия	ИК-влажнометрия; дефекты структуры композитов, готовых панелей, клеевых соединений, защитных покрытий
Микроэлектроника	Лазерный контроль пайки, сварки; ИК-томография полупроводников, больших интегральных схем; дефекты теплоотводов



Продолжение таблицы 9.2

Область применения	Способ, объекты контроля, выявляемые дефекты
Машиностроение	Дефектоскопия антикоррозионных покрытий, обнаружение мест подповерхностного расслоения композитов
Лазерная техника	Контроль термонапряжений в лазерных кристаллах, световой прочности элементов силовой оптики
Строительство	Контроль теплопроводности строительных материалов, защитных ограждений, обнаружение пустот, промоин и т. д.
Нефтехимия	Термографический контроль уровня жидкостей в резервуарах
Атомная энергетика	Тепловая дефектоскопия тепловыделяющих элементов, анализ пористости материалов, контроль НДС металла
Автомобильная промышленность	Тепловая дефектоскопия шин, покрытий, упрочняющих покрытий, качества закалки и термоупрочнения
Энергетика	Тепловизионный контроль статоров, защитных покрытий, термоизоляции
Агрокомплекс	Контроль теплофизических характеристик продуктов, дефектоскопия деталей с.-х. техники
<b>Пассивный ТНК</b>	
Энергетика	Тепловая диагностика турбин, дымовых труб, энергоагрегатов, контактных сетей, теплоизоляции
Нефтехимия	Тепловизионный контроль реакторных колонн и энергоагрегатов, обнаружение утечек из продуктопроводов
Машиностроение	Контроль тепловых режимов машин, механизмов, обнаружение аварийно- и пожароопасных мест на энергонасыщенных промышленных объектах
Строительство	Обнаружение утечек тепла в зданиях, тепловизионный контроль качества кровли, ограждающих конструкций
Экологический мониторинг	Дистанционный контроль утечек тепла, загрязнений на водных поверхностях, выявление тепловых аномалий, обнаружение пустот, промоин и т. д.
Металлургия	Пирометрический контроль температуры расплавов, тепловизионная диагностика футеровки, контроль горячего проката
Транспорт	Обнаружение перегрева букс, дефектов контактных сетей, изоляторов, тепловая диагностика электрооборудования ПС
Авиация	Пирометрия лопаток газотурбинных двигателей, аэродинамический эксперимент, контроль теплового режима бортовой радиоэлектронной аппаратуры
Цементная промышленность	Контроль равномерности нагрева печей и их режимов
Агрокомплекс	Контроль тепловых режимов теплиц и ферм, состояния животных, температуры зерна в элеваторах
Электроника	Тепловая диагностика радиоэлектронной аппаратуры, больших интегральных схем, температурный контроль технологических процессов

### Окончание таблицы 9.2

Область применения	Способ, объекты контроля, выявляемые дефекты
Лазерная техника	Анализ тепловых режимов активных элементов мощных лазеров
Термоядерная энергетика	Тепловая диагностика плазмы, ИК-томография
Медицина, здравоохранение	Термодиагностика сосудистых заболеваний, онкологии, кожных болезней и др.

## 9.3 Оптическая пирометрия. Основы теории теплового излучения

Методы бесконтактного измерения температуры тел по их тепловому излучению называют методами пирометрии излучения.

Бесконтактные методы теплового контроля основаны на анализе ИК-излучения, испускаемого нагретыми телами. Инфракрасное излучение занимает диапазон длин волн от 0,76 до 1000 мкм. На практике в тепловом НК преимущественно используются два спектральных диапазона 3–5 и 8–14 мкм, совпадающие с окнами максимальной прозрачности атмосферы и являющиеся наиболее информативными.

*Тепловое излучение (радиационный теплообмен)* – способ переноса теплоты в пространстве, осуществляемый в результате распространения электромагнитных волн, энергия которых при взаимодействии с веществом переходит в тепло.

### 9.3.1 Радиационный теплообмен

Радиационный теплообмен обладает следующими особенностями:

1 Все тела с температурой  $> 0$  К обладают собственным тепловым излучением, то есть энергию излучают все тела (твердые тела, жидкости и лучепрозрачные газы).

2 Для передачи теплоты излучением не требуется тело-посредник, т. е. лучистая энергия может передаваться и в вакууме.

3 При температурах до 100 °С лучистая и конвективная (при свободной конвекции) составляющие теплообмена имеют один порядок. В высокотемпературных энергетических (например, парогенераторах) и высокотемпературных теплотехнологических (например, металлургических печах) лучистый теплообмен является доминирующим (до 100 %) в суммарном теплопереносе от горячего теплоносителя к потребителю тепловой энергии.

4 Различают поверхностное (твердые тела) и объемное излучение (лучепрозрачные газы).

*Спектром излучения* называют распределение лучистой энергии по длине волны  $E_\lambda = f(\lambda)$ , где  $E_\lambda$  – спектральная лучеиспускательная способность тела, Вт/м<sup>2</sup>. У большинства твердых тел спектры сплошные. У газов и полированных металлов спектры *линейчатые* или *селективные*.

С точки зрения радиационного теплообмена различают два типа поверхностей: *диффузные* и *зеркальные* поверхности. Диффузные поверхности отражают всё падающее на них излучение в пределах полусферы. У зеркальных поверхностей угол падения луча равен углу его отражения.

### 9.3.2 Излучение абсолютно черного тела

Для характеристики теплового излучения удобным оказалось понятие абсолютного черного тела (АЧТ – *Black body*), т. е. тела, поглощающего все падающее на него излучение. Излучение АЧТ является функцией только его температуры. Физической моделью АЧТ может служить замкнутая полость с отверстием, значительно меньшим ее линейных размеров.

Абсолютно черных тел в природе не существует. В качестве реальной модели АЧТ используют отверстие в стенке непрозрачной полости с размерами много меньше самой полости. При равномерном нагреве всей поверхности полости данное отверстие по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу, т.е. поглощает всё падающее на него излучение и само при этом является идеальным излучателем – излучает максимально возможное количество энергии.

Законы изучения АЧТ могут применяться с некоторой поправкой для большинства реальных тел.

### 9.3.3 Излучение реальных тел

**Закон Планка:** энергия излучения неравномерно распределяется по длинам волн.

В 1900 г. на основе квантовой теории немецкий физик Макс Планк вывел закон, устанавливающий зависимость плотности потока излучения (спектральная интенсивность излучения) АЧТ  $r_{\lambda,T}^*$ , Вт/м<sup>2</sup>, от длины волны  $\lambda$  и абсолютной температуры  $T - r_{\lambda,T}^* = f(\lambda, T)$ . Этот закон носит имя Планка и имеет вид:

$$r_{\lambda,T}^* = \frac{C_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1}, \quad (9.2)$$

где  $T$  – абсолютная температура абсолютно черного тела, К;  $C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, связанные с универсальными физическими константами соотношениями  $C_1 = 2\pi hc^2 = 3,742 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup>;  $C_2 = hc/k = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К, в которых  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света в вакууме;  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка;  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

График зависимости  $r_{\lambda,T}^* = f(\lambda, T)$  изображен на рисунке 9.3. Анализ этого графика позволяет сделать следующие выводы:

- зависимость  $r_{\lambda,T}^* = f(\lambda, T)$  имеет экстремальный характер;
- с ростом температуры длина волны  $\lambda_{\max}$ , при которой наблюдается максимум спектральной плотности потока излучения АЧТ, уменьшается.

**Закон Кирхгофа:** отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, равно излучательной способности АЧТ  $r_{\lambda,T}^*$  и является универсальной функцией частоты (длины волны) и температуры.

Кирхгоф установил количественную связь между спектральной плотностью потока излучения (спектральная плотность энергетической светимости)  $r_{\lambda,T}$  тела и его спектральной поглощательной способностью  $\alpha(\lambda, T)$ , которая выражается отношением

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha(\lambda, T)} = r_{\lambda,T}^* \quad (9.3)$$

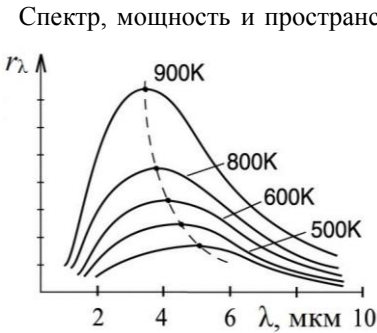


Рисунок 9.3 – Спектральная плотность потока излучения АЧТ

Спектр, мощность и пространственные характеристики теплового излучения зависят от температуры тела и его излучательной способности, обусловленной, в основном, его материалом и микроструктурными характеристиками излучающей поверхности. Например, шероховатые поверхности излучают сильнее, чем зеркальные. При повышении температуры мощность излучения быстро растет, а ее максимум сдвигается в область более коротких длин волн (см. рисунок 9.3). Эта закономерность характеризуется законом смещения Вина.  $r_{\lambda}$

**Закон смещения Вина:** длина волны  $\lambda_{\max}$ , мкм, при которой наблюдается максимальное значение спектральной плотности потока излучения АЧТ  $r_{\lambda,T}^*$ , и температура  $T$  связаны обратно пропорциональной зависимостью:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}, \quad (9.4)$$

где  $b = 2,898 \cdot 10^{-3}$  м·К – постоянная Вина.

Этот закон является следствием закона Планка. Однако он был получен Вином ранее (1893 г.) и поэтому носит его имя. Зная  $\lambda_{\max}$ , по формуле (9.4) легко найти температуру излучателя. Так, объект (в том числе и кожный по-

кров человека) с температурой  $\approx 300 \text{ K}$  ( $30 \text{ }^\circ\text{C}$ ) имеет максимум излучения на длине волны  $10 \text{ мкм}$ , Солнце при  $T_{\text{эфф}} = 6000 \text{ }^\circ\text{C} - 0,5 \text{ мкм}$ , а жидкий азот с  $T_{\text{кип}} = 77 \text{ K} - 38 \text{ мкм}$ .

Спектр излучения может быть непрерывным или дискретным. Характер спектра зависит, в основном, от агрегатного состояния вещества. Для твердых тел и жидкостей, как правило, характерны непрерывные спектры излучения, а для газов – линейчатые, которые при больших давлениях или больших толщинах чаще переходят в непрерывный.

**Закон Стефана – Больцмана:** интегральная энергетическая светимость АЧТ пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры.

Закон Стефана – Больцмана при условии термодинамического равновесия устанавливает связь интегральной энергетической светимости (полная испускаемая способность) АЧТ  $M_0$ ,  $\text{Вт/м}^2$ , с его абсолютной температурой  $T$ :

$$M_0 = \int_0^{\infty} \epsilon_{\lambda, T}^* d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{C_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} d\lambda = \sigma T^4, \quad (9.5)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

Закон Стефана – Больцмана был экспериментально установлен Стефаном (1879), а теоретически обоснован Больцманом (1884) и Планком (1901).

В инженерных расчетах закон Стефана – Больцмана удобно применять в следующем виде:

$$M_0 = \epsilon_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (9.6)$$

где  $\epsilon_0$  – коэффициент излучения АЧТ,  $\epsilon_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K}^4)$ .

Для реальных тел законы излучения АЧТ применимы только в первом приближении. Их излучение может отличаться от излучения АЧТ при той же температуре как спектральным составом, так и интенсивностью.

Тела, излучение которых имеет тот же спектр, что и излучение АЧТ при данной температуре, и отличается от него только интенсивностью, называются **серыми**.

Для оценки излучательной способности реальных (*серых*) тел вводят понятие коэффициента излучения  $\epsilon(\lambda, T) < 1,0$ . Для АЧТ и серых тел  $\epsilon(\lambda_1, T) = \alpha(\lambda_1, T)$ , т. е. коэффициент излучения равен коэффициенту поглощения реального тела (спектральная поглощательная способность).

## 9.4 Физические основы измерения температуры

Практика неразрушающих испытаний привела к необходимости точного количественного описания энергетического состояния контролируемых объектов, естественной мерой которого является их температура.

В распространенной шкале Цельсия в качестве опорных точек приняты температуры  $t$  замерзания ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и кипения ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) воды. Рабочими веществами в этой шкале служат спирт или ртуть.

Если начало отсчета установлено от абсолютного нуля температур, то получаем абсолютную термодинамическую шкалу, единицей которой служит градус Кельвина (К).

Значения температур по этим шкалам соотносятся  $T = t + 273,15$ .

Измерение температуры нагретых тел основано на использовании законов теплового излучения (ТИ). Методы измерения температуры, использующие зависимость спектральной плотности энергетической светимости  $R_{\lambda,T}$  или интегральной энергетической светимости  $R_e(T)$  тел от температуры называют *оптической пирометрией*. Приборы для измерения температуры нагретых тел по интенсивности их ТИ называют *пирометрами*.

В зависимости от того, какой закон ТИ используется при измерении температуры различают *радиационную, яркостную и цветовую* температуры.

1 *Радиационная температура*  $T_p$  – температура АЧТ, при которой его энергетическая светимость  $M_e(T)$  равна энергетической светимости  $M_e(T)$  исследуемого тела. Очевидно, что  $T_p = T_{\text{и}} \sqrt[4]{\varepsilon}$ . Радиационная температура всегда меньше истинной температуры.

2 *Яркостная температура*  $T_y$  – температура АЧТ, при которой для определенной длины волны  $\lambda$  его спектральная плотность энергетической светимости  $r_{\lambda,T}^*$  равна спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела  $r_{\lambda,T}$ . По закону Кирхгофа при длине волны  $\lambda$  имеем

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\varepsilon(\lambda,T)} = r_{\lambda,T}^* \quad \text{или} \quad \varepsilon(\lambda,T) = \frac{r_{\lambda,T_y}}{r_{\lambda,T_{\text{и}}}}. \quad (9.7)$$

Так как для серых тел  $\varepsilon(\lambda,T) < 1$ , то  $T_y < T_{\text{и}}$ .

3 *Цветовая температура*  $T_{\text{ц}}$ . Распределение энергии в спектре излучения серого тела такое же, как и в спектре АЧТ, имеющего такую же температуру, поэтому к серым телам применим закон смещения Вина. Зная длину волны  $\lambda_{\text{max}}$ , соответствующую максимальной спектральной плотности энергетической светимости исследуемого тела  $r_{\lambda,T}$ , можно определить темпера-

$$\text{туру } T_{\text{ц}} = \frac{b}{\lambda_{\text{max}}}.$$

Однозначная связь между мощностью и спектром излучения и температурой тела существует только для АЧТ. Для реальных объектов введены понятия эквивалентных температур.

При определении температуры изделий, находящихся в непосредственной близости от сильно нагретых тел, необходимо учитывать излучение фона, отраженное от объекта контроля.

При контроле реальных объектов необходимо учитывать также эффекты ослабления ИК-излучения в атмосфере или среде, отделяющих изделие от детектора. При этом ослабление теплового потока в среде описывается законом Бугера:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-kl), \quad (9.8)$$

где  $\Phi$  – поток, прошедший среду толщиной  $l$ ;  $\Phi_0$  – исходное значение потока;  $k$  – натуральный показатель ослабления, учитывающий поглощение и рассеяние излучения.

### 9.5 Источники тепловой стимуляции объектов ТК

В методах активного теплового контроля важную роль играют источники нагрева (стимуляции), служащие для усиления теплового излучения исследуемых объектов.

Физическая природа тепловой стимуляции зачастую определяет тип процедуры ТК и схему стимуляции. Как правило, объект контроля нагревают, поскольку интенсивность охлаждения обычно невысока (исключение составляет охлаждение раскалённого металла струёй воды).

Распространены следующие типы нагрева: 1) оптический; 2) индукционный; 3) сверхвысокочастотный (СВЧ); 4) электрическим током; 5) механический; 6) горячими или холодными газами, или жидкостями. Пространственные профили зон нагрева показаны на рисунке 9.4

Согласно теории ТК, изложенной выше, наилучшее выявление скрытых дефектов в конструкционных материалах обеспечивает мощный кратковременный нагрев. Этому требованию соответствуют все вышеперечисленные виды нагрева, за исключением механического и с помощью газов или жидкостей.

Стимулирующий нагрев *электрическим током* используют преимущественно в лабораторных исследованиях, за исключением ТК электротехнических и радиоэлектронных компонент, нагреваемых электрическим током в процессе их функционирования.

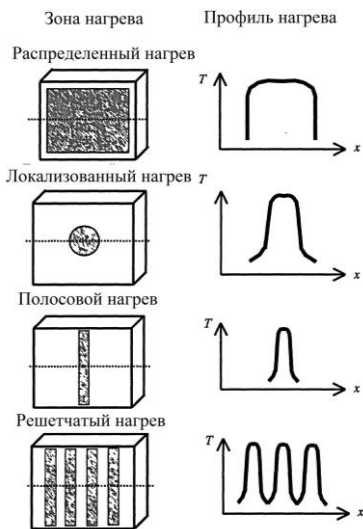


Рисунок 9.4 – Профили зон нагрева

*Контактные электронагреватели* либо подают мощные импульсы электрического тока непосредственно в металлические изделия, либо нагревают изделия за счет теплопроводности при механическом контакте.

Важные преимущества нагревателей первого типа – кратковременность (доли и единицы секунд) действия нагрева и отсутствие излучательных помех, их недостатки – большая сила тока во вторичной обмотке понижающего трансформатора и наличие контактного сопротивления между изделием и концами вторичной обмотки.

Нагреватели второго типа, снабжаемые выравнивающими медными пластинами, могут создавать большую зону нагрева, но обладают большой тепловой инерцией, создают мощную излучательную помеху и требуют хорошего контакта поверхности нагрева с изделием.

Часть из указанных недостатков преодолена в современных гибких нагревателях, в частности, на углеродных нитях. Нагреватель подобного типа, названный «тепловым одеялом», применяется европейским концерном Airbus Industry для обнаружения воды в композиционных сотовых панелях самолетов.

В *индукторах* и *СВЧ-нагревателях* используют эффект преобразования энергии поля, созданного током высокой частоты, в тепловую энергию. При индукционном нагреве металлическое изделие должно быть охвачено витком провода, по которому пропущен переменный ток, создающий переменное магнитное поле.

Вследствие электромагнитной индукции в изделии наводятся вихревые токи, которые вызывают нагрев металла. При возрастании частоты тока возрастает *skin*-эффект, проявляющийся в неравномерном распределении плотности тока по сечению и увеличении его на поверхности. Энергетически рациональность процесса индукционного нагрева определяют по наименьшей частоте тока, обеспечивающей приемлемый КПД:

$$f_{\min} = 8/(L\mu\rho), \quad (9.9)$$

где  $L$  – средний размер нагреваемого тела, м,  $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м;  $\rho$  – удельная электрическая проводимость, Ом/м.

*Индукционный нагрев*, весьма распространённый в металлургии, в ТНК используется сравнительно редко. Этот вид нагрева эффективен для тепловой стимуляции металлов, расположенных за неметаллами. При этом хорошо выявляются дефекты в зоне контакта металл – неметалл. Для стальных сплавов можно применять ток промышленной частоты (50 Гц).

Нагрев диэлектриков переменным электрическим полем происходит благодаря феномену переполяризации, протекающему с преодолением сил внут-



ренного трения при ориентации диполей. Для нагрева используют диапазоны волн: средневолновый ( $f = 300 \dots 3000$  кГц), коротковолновый ( $f = 3 \dots 30$  МГц) и метровый ( $f = 3 \dots 300$  МГц).

Эффективность нагрева возрастает при увеличении тангенса угла потерь диэлектрика  $\operatorname{tg}\delta$ . Удельную мощность  $W$  (Вт/см<sup>3</sup>), подводимую источником высокочастотной энергии к телу, которое размещено между пластинами конденсатора, определяют по формуле

$$W = 0,55 \cdot 10^{-12} \varepsilon f E^2 \operatorname{tg}\delta, \quad (9.10)$$

где  $f$  – частота, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/см.

С точки зрения ТНК, дополнительным преимуществом нагрева излучением СВЧ-диапазона, как и электрическим током, является то, что он может действовать по всему объему тела, повышая контраст температуры в зоне дефекта. В частности, СВЧ-нагрев имеет неоспоримые преимущества при обнаружении влаги в пористых неметаллах.

В дуговых нагревателях газа – *плазмотронах* – используется столб плазмы, возникающей между катодом из тугоплавкого материала и анодом, в качестве которого служит изделие или сопло. В сопло, изготовленное обычно из меди и охлаждаемое водой, подается газ, молекулы или атомы которого ионизируются при высокой температуре. В плазменных установках для резки металлов плотность энергии может достигать  $2 \cdot 10^{10}$  Вт/м<sup>2</sup>. Плазмотрон можно использовать для быстрого сканирующего нагрева, однако нестабильность пламени, оптические помехи, громоздкость и высокая стоимость не позволяют сделать его неперспективным для ТНК.

Практически не используют в ТНК *электронно-лучевые пушки*, которые могут создавать плотность потока до  $10^{11}$  Вт/м<sup>2</sup>, однако требуют вакуума не менее  $10^5$  Па (при нормальном давлении длина свободного пробега электронов составляет  $\approx 3,5 \cdot 10^{-3}$  м).

При ТНК слоистых, композиционных и сотовых изделий, применяющихся главным образом в авиакосмической технике, наиболее популярны оптические способы нагрева, которые реализуют с помощью: лазеров, галогенных ламп импульсных и непрерывного действия, электрических ламп накаливания.

Достоинством *лазеров* является возможность варьировать размеры зоны нагрева, монохроматичность излучения и высокая плотность мощности (до  $10^{21}$  Вт/м<sup>2</sup>). Монохроматичность важна, если поверхность изделия в ходе нагрева визируют тепловизором, поскольку при этом возможно разнесение спектрального диапазона лазера и тепловизора, однако на практике такой способ ТНК разрабатывался для ограниченного круга задач. Высо-

кую плотность мощности лазерного нагрева получают в зонах малого размера, поэтому такой способ плохо сочетается с тепловизионной регистрацией температуры. При использовании технологии «летающего пятна» мощность лазерного излучения «размазывается» по большой площади, снижая среднюю подводимую мощность. Учитывая, что КПД лазеров, как правило, невелик, их практическое применение в ТНК ограничено определением температуропроводности высокотеплопроводных образцов.

В практических установках (например, фирмы Thermal Wave Imaging, США), используемых в авиакосмической промышленности, чаще всего применяют ксеноновые импульсные лампы. Такие лампы используют для накачки лазеров.

Спектр излучения ксеноновых ламп равномерный в интервале от 0,2 до 1,4 мкм с выбросами на некоторых длинах волн. Применение импульсных ламп часто требует введения дополнительных устройств фокусировки.

Одной из проблем применения кратковременного мощного излучения (0,1–1 мс) может быть перегрев изделия в конце действия импульса. Температура тонкого приповерхностного слоя изделия может превысить сотни, а в ряде случаев, тысячи градусов, в результате чего, например, возможно испарение покрытий различного типа (краски). Для устранения этого явления необходимо увеличивать длительность импульса до 10–100 мс.

Другой проблемой оптического нагрева металлов является их высокий коэффициент отражения, что существенно снижает эффективную поглощаемую энергию и приводит к нежелательным отражениям. Поэтому металлы, в особенности, алюминий, медь, нержавеющая сталь и т. п., целесообразно контролировать тепловым методом при наличии на их поверхностях красок или лаков любых типа и цвета.

Весьма технологичными являются *ИК-излучатели*, которые подразделяют на: 1 – высокотемпературные, нагреваемые до 1500 °С (ИК-лампы накаливания, кварцевые галогенные лампы и т. п.); 2 – низкотемпературные, нагреваемые до 450–1000 °С (кварцевые стеклянные, керамические, металлические и другие излучатели); 3 – низкотемпературные, нагреваемые до 450 °С (стеклянные, керамические, металлические).

*Кварцевые галогенные лампы*, мощность которых изменяется от 0,5 до 2,5 кВт, выпускают различной формы и размеров. На их основе разрабатывают достаточно мощные и гибкие нагреватели, пригодные для ТНК разнообразных изделий, выполненных преимущественно, из неметаллов. Длительность нагрева в таких случаях не превышает десятков секунд. Сходных результатов, но при более длительном нагреве достигают, используя стандартные лампы накаливания.


Большое количество ламп накаливания объединяют в батареи, обеспечивающие нагрев на значительной площади.

Возможно использование одиночных ламп накаливания большой мощности (до 1 кВт) в светильниках прожекторного типа. Одиночные лампы с внешними или внутренними рефлекторами хорошо стыкуются с точечными ИК-радиометрами. Плотность энергии в зоне облучения ламповыми нагревателями может достигать 50 кВт/м<sup>2</sup>.

В некоторых задачах ТНК возможно использование солнечного излучения, плотность мощности которого в средних широтах в безоблачный день составляет  $\approx 1$  кВт/м<sup>2</sup>.

Оптическое излучение легко поддается модуляции, что используют в методе тепловых волн. Форма одиночного импульса нагрева, чаще всего, не имеет существенного значения для результатов ТК. Как правило, при моделировании процедур ТК, используют формы импульса нагрева, приведенные в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Формы импульсов нагрева при моделировании задач ТК

Импульс Дирака	Прямоугольный импульс	Гауссовский импульс	Последовательность импульсов
			

Для того чтобы реализовать высокую производительность тепловидения, источник нагрева должен обеспечивать требуемую плотность энергии в зоне как можно большего размера. Форму и размер зоны нагрева удобно определять эмпирически, используя зачерненную мишень, выполненную из материала с низкой теплопроводностью.

Со строчно-сканирующими системами хорошо сочетаются полосовые нагреватели сопротивлением на основе сплавов с высоким электрическим сопротивлением (нихром, фехраль, константан), выпускаемые в виде проволочек, лент и полос.

Часто используют нагреватели в виде цилиндрического керамического стержня, на который вплотную или с шагом намотана нихромовая проволока толщиной 0,5–3 мм. Такие нагреватели обладают регулируемым распределением потока по длине, обеспечивая плотность энергии до 100 кВт/м<sup>2</sup>. Из промышленных устройств к ним наиболее близки трубчатые электронагреватели. Недостатки полосовых нагревателей – необходимость размещать их вблизи объекта контроля, трудность нагрева больших зон и высокая инерционность.

В комплекте с тепловизорами перспективно применение *плоских нагревателей* с пластинчатым зигзагообразным телом накала из высокоомных резистивных материалов и сплошных полупроводящих слоев, нанесенных на термостойкое стекло.

Наиболее прост в реализации способ нагрева изделий с помощью потока горячего воздуха, производимого устройствами типа фена, или «воздушной пушки» (*fan, air gun*). Температуру поверхности можно контролировать тепловизором в ходе нагрева, однако эффективная мощность, поглощаемая изделием, при этом невелика ( $\leq 500 \text{ Вт/м}^2$ ). Данный вид нагрева применим для ТНК неметаллов, в которых, с одной стороны, температурные градиенты развиваются в течение длительного времени, а с другой – имеется опасность перегрева поверхности при использовании более мощного нагрева.

Слабый равномерный нагрев возможен путем перемещения объекта контроля из помещения с одной температурой в другое более теплое (холодное) помещение. Такой способ был предложен еще в 1965 г. при ТНК корпусов ракетных двигателей.

Тепловую стимуляцию путем охлаждения осуществляют путем размещения изделий в холодильнике или опрыскивания жидким азотом. Воду в сотовых авиационных панелях можно обнаружить при посадке самолета за счет естественной разницы температур в условиях полета и на земле.

В последние годы интенсивно разрабатывают процедуру ТНК с использованием УЗ-возбуждения тепловых полей, основным преимуществом которой является селективный нагрев специфических дефектов при практически ненагреваемом объекте испытаний.

При выборе **оптимального источника** тепловой стимуляции руководствуются следующими факторами: 1) степенью контакта с объектом; 2) необходимой длительностью нагрева; 3) возможностью модулировать излучение; 4) излучаемой мощностью (энергией); 5) мощностью (энергией), эффективно поглощаемой конкретным объектом контроля; 6) спектральным диапазоном (в случае использования оптического излучения); 7) шумами, создаваемыми в тракте регистрации температуры; 8) требованиями техники безопасности; 9) КПД.

Одним из основных требований, предъявляемых к теплогенератору, является *обеспечение допустимой равномерности нагрева по всей площади нагреваемой поверхности*.

## 9.6 Средства контроля температуры

Для получения объективных показателей при ТНК применяют термоминдикаторы и первичные измерительные преобразователи теплового излучения, реализующие различные физические принципы.

### Термоминдикаторы

Для преобразования потока теплового излучения или распределения тем-пературы по поверхности контролируемого объекта в видимое изображение используются различные индикаторы на основе термочувствительных веществ: пластины, пленки и составы на основе термочувствительных веществ, изменяющих свое физическое состояние или цвет при достижении определенной температуры.

Различают термоиндикаторы *плавления, меняющие цвет, люминоформные.*

*Термоиндикаторы плавления.* Принцип их действия основан на плавлении материала индикатора при достижении определенной температуры. Выпускаются такие индикаторы в виде наборов термокарандашей, термокрасок, термолаков, термотаблеток, термopорошков, термосвидетелей.

*Термоиндикаторы, меняющие цвет.* Принцип их действия основан на различных физико-химических превращениях, как то: химическое взаимодействие компонентов; изменение физических свойств за счет перестройки структуры, плавления отдельных компонентов; изменение оптических свойств. Существуют адсорбентные, двухслойные индикаторы, фотоэмульсии, жидкие кристаллы.

*Люминоформные индикаторы* используют явление температурного тушения люминесценции: изменяется интенсивность или цвет люминесценции некоторых веществ под действием температуры. Широко используются люминофоры на основе сульфидов цинка и кадмия.

### **Первичные измерительные преобразователи теплового излучения**

В зависимости от принципа действия приборы для измерения температуры и теплового излучения делятся на несколько групп.

*Приборы для измерения температуры (контактные):*

1) термометры расширения, основанные на изменении объема жидкости или линейных размеров твердых тел при изменении температуры;

2) манометрические термометры, основанные на изменении давления при постоянном объеме при изменении температуры;

3) термометры сопротивления (терморезисторы, термисторы), основанные на изменении сопротивления проводников и полупроводников при изменении температуры;

4) термоэлектрические термометры (термопары), основанные на изменении термоэлектродвижущей силы термопары при изменении температуры.

*Приборы для измерения теплового (ИК) излучения (бесконтактные):*

1) термоэлементы – термоэлектрические термометры;

2) болометры – термометры сопротивления;

3) пирометры излучения – наибольшее распространение получили: *яркостные* (оптические), основанные на изменении яркости монохроматического потока излучения от температуры; *цветовые*, основанные на изменении распределения энергии в спектре теплового излучения тела; *радиационные*,

основанные на изменении полного потока излучения в зависимости от температуры;

4) акустооптические приемники, основанные на изменении давления газа при поглощении ИК-излучения;

5) пирозлектрические приемники, основанные на эффекте возникновения электрического заряда на поверхности некоторых полупроводников при их нагревании потоком ИК-излучения.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Физические основы ТНК.
- 2 Законы теплового излучения.
- 3 Классификация способов тепловой дефектоскопии.
- 4 Сущность модели активного ТНК пассивных дефектов.
- 5 Сущность модели пассивного ТНК активных дефектов.
- 6 Основы теории теплового излучения.
- 7 Физические основы измерения температуры.
- 8 Источники тепловой стимуляции объектов ТНК (типы нагрева).
- 9 Профили зон нагрева и формы импульсов нагрева при моделировании задач ТНК.
- 10 Принцип работы термоиндикаторов.
- 11 Средства контроля температуры: приборы для измерения теплового излучения (контактные и бесконтактные).

6)

# 10 РАДИАЦИОННЫЙ ВИД НК

## 10.1 Общие сведения

**В** 1895 г., 28 декабря, журнале Вюрцбургского физико-медицинского общества была опубликована статья профессора Вильгельма Конрада Рентгена под названием «О новом типе лучей». Посылая рукопись председателю общества, Рентген для убедительности и наглядности приложил снимок кисти своей супруги с обручальным кольцом на пальце. Таким образом Берта Рентген оказалась увековечена в истории науки (рисунок 10.1).

Рентген открыл излучение, названное впоследствии его именем, а сами лучи называют также *X*-лучами (*X-ray*).

Однажды он получил письмо от английского моряка, и его просьба в письме сильно озадачила Вильгельма:

*«Я прочёл в газете, что вы изобрели лучи, способные просвечивать организм. У меня застряла пуля в грудной клетке, но врачи не могут её убрать, т. к. не знают, где именно она находится. Пришлите мне, пожалуйста, несколько X-лучей почтой вместе с инструкцией по их использованию. Я найду пулю и обязательно верну вам все лучи».*

Сначала великий физик удивился, но потом не растерялся и ответил очень оригинально:

*«К сожалению, сейчас нет возможности переслать эти X-лучи почтой, да и не так их много у меня, чтобы по почте рассылать. Но вы можете выслать мне в конверте вашу грудную клетку, и я верну её с указанием точного местонахождения пули!».*

Радиационный вид НК основан на регистрации и анализе проникающего ионизирующего излучения после взаимодействия его с контролируемым объектом [7, 8, 20, 82–84].

В основе различных методов радиационной дефектоскопии лежат способы регистрации интенсивности излучения за исследуемым объектом.

**Первичный информативный параметр** – плотность потока излучения.

Радиационные методы можно классифицировать следующим образом.

1 *В зависимости от природы ионизирующего излучения* (рисунок 10.2).



Рисунок 10.1 – Снимок кисти руки жены Рентгена – Берты (28.12.1895)

Выделяют рентгеновский,  $\gamma$ -,  $\beta$ - (поток электронов), нейтронный методы контроля. Находят применение потоки позитронов: по степени их поглощения определяют участки объекта, обедненные или обогащенные электронами.

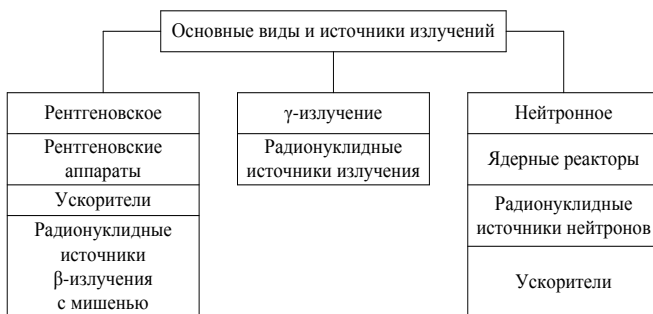


Рисунок 10.2 – Классификация методов РНК по природе ионизирующего излучения

2 По способу регистрации (используемому приемнику излучения) (рисунок 10.3):

- радиографический метод (приемник излучения – рентгеновская пленка);
- радиоскопический метод (приемник излучения – флюоресцирующий экран с последующим преобразованием изображения в телевизионное);
- радиометрический метод (приемник излучения – сканирующий сцинтилляционный счетчик частиц и фотонов).



Рисунок 10.3 – Классификация методов РНК по способу регистрации

3 По характеру взаимодействия с контролируемым объектом (физическому принципу получения информации о контролируемом параметре, условия измерения).

Выделяют методы, основанные на регистрации прошедшего через объект излучения (просвечивание) и методы, основанные на регистрации рассеянного в объекте и вышедшего из него под различным углом излучения.



При радиационном контроле используют как минимум три основных элемента: источник ионизирующего излучения; контролируемый объект; детектор, регистрирующий дефектоскопическую информацию.

При прохождении через изделие ионизирующее излучение ослабляется – поглощается и рассеивается (рисунок 10.4).

Степень ослабления зависит от толщины  $\delta$ , плотности  $\rho$  и атомного номера материала контролируемого объекта, а также от интенсивности  $M$  и энергии  $E$  излучения. При наличии в веществе внутренних дефектов с характеристическим размером  $\Delta\delta$  изменяются интенсивность и энергия пучка излучения.

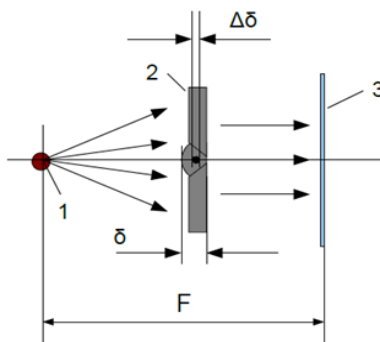


Рисунок 10.4 – Схема просвечивания:  
1 – источник; 2 – объект контроля; 3 – детектор

## 10.2 Физические основы радиационного НК

### 10.2.1 Механизмы возникновения рентгеновского и $\gamma$ -излучений

Основными направлениями радиационной дефектоскопии являются рентгено- и  $\gamma$ -дефектоскопия. Различие между рентгеновской и  $\gamma$ -дефектоскопией заключается в используемых источниках ионизирующих излучений, однако ввиду общности способов регистрации излучения и целей испытаний они имеют общую методику и технологию проведения контроля в производственных условиях. Рентгеновские и  $\gamma$ -лучи обладают той же самой природой, что и видимый свет (электромагнитное излучение). Диапазон длин волн жесткого электромагнитного излучения приведен в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Диапазон энергий и длин волн рентгеновского и  $\gamma$ -излучения

Вид излучения	Диапазон энергий, кэВ	Диапазон длин волн, нм
Рентгеновское излучение	0,11–100	0,01–12
Гамма-излучение	10–5000	0,0002–0,12

### О терминологии жесткого электромагнитного излучения

*Рентгеновское излучение* – это тормозное или характеристическое излучение атомов.

*$\gamma$ -излучение* – это фотонное излучение, возникающее при изменении энергетического состояния атомных ядер или при аннигиляции частиц.

Тормозное излучение больших энергий или фотонное излучение высокоэнергетических заряженных частиц при изменении направления движения, также иногда называют *синхротронным* излучением.

Рентгеновское и  $\gamma$ -излучение являются ионизирующим излучением, т. е. оно способно при прохождении через вещество выбить из атомов электроны. При этом образуются положительно заряженные ионы и электроны. Кроме того, высокоэнергетическое ионизирующее излучение обладает большой проникающей способностью, поэтому оно нашло широкое применение в неразрушающем исследовании живых и неживых объектов.

Энергия кванта связана с длиной волны  $\lambda$  (частотой  $\nu$ ) электромагнитного излучения:  $E = hc/\lambda = h\nu$ , где  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света в вакууме.

Электромагнитное излучение возникает, когда частицы в результате какого-то изменения теряют энергию. Это может произойти при торможении, изменении направления движения или переходе на более низкий энергетический уровень в электронной оболочке атома.

Элементарные процессы, которые могут приводить к испусканию фотонного излучения, можно разделить на три группы.

#### 1 Ускоренное движение заряженных частиц.

К этой группе относятся процессы излучения при торможении заряженных частиц в веществе (рисунок 10.5) или при излучении частиц, движущихся по круговой траектории, например, при движении заряда в однородном магнитном поле.

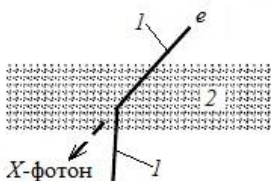


Рисунок 10.5 – Изменение траектории заряженной частицы  $I$  при прохождении через вещество  $2$  в результате взаимодействия с электронной оболочкой атома

Под воздействием электрического поля атома заряженная частица (например, электрон) изменяет траекторию движения и движется ускоренно (рисунок 10.6). При этом она испускает фотон. Это явление носит название *тормозного излучения*.

В качестве примера можно привести заряженные частицы, движущиеся в циклических ускорителях (бетатроне, циклотроне и др.). Здесь обнаруживается естественный предел для энергии ускоряемой частицы, когда энергия, сообщаемая частице за период, становится равной энергии излучения.

Под энергетическим спектром понимают распределение частиц или квантов по энергии. Фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, возникающее при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц, называют *тормозным излучением*.

Часто тормозным излучением называют излучение электронов, ускоряемых электрическим полем атома; циклотронное и синхротронное излучение генерируется заряженной частицей, ускоряемой в стационарном магнитном поле.

Энергетические потери электрона, которые эмитируются в виде рентгеновских квантов, распределяются между нулем и максимальной энергией, которая была приобретена электроном благодаря ускорению в электрическом поле.

Если между анодом и катодом приложено напряжение 50 кВ, то электроны приобретают энергию 50 кэВ. При торможении в материале анода может быть достигнута максимальная энергия кванта 75 кэВ, т. е. распределение многих рентгеновских квантов по энергиям лежит в диапазоне от нуля до максимальной энергии.

Представляя интенсивность этого вида рентгеновских лучей в зависимости от энергии, получают спектр тормозного излучения трубки (рисунок 10.7).

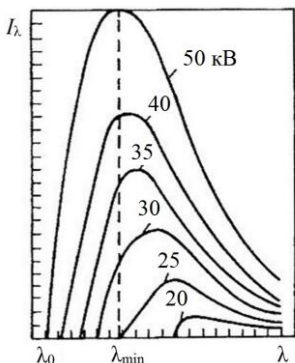


Рисунок 10.7 – Спектр тормозного излучения молибдена (Mo)

При торможении электрона с кинетической энергией  $eU$  в мишени может происходить несколько процессов передачи энергии. Вся кинетическая энергия электрона преобразуется в лучевую энергию одного рентгеновского кванта в исключительно редких случаях. При этом интенсивность излучения резко падает вблизи некой минимальной длины волны  $\lambda_{\min}$ , которую

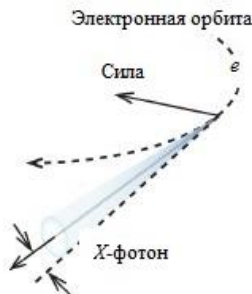


Рисунок 10.6 – Излучение при круговом движении электрона

С увеличением тока трубки при постоянном напряжении увеличивается интенсивность излучения. Увеличение ускоряющего напряжения при заданном анодном токе изменяет спектр излучения со смещением максимума излучения в сторону коротких волн (см. рисунок 10.7). Это можно объяснить, если предположить, что начальная скорость у электрона на поверхности катода равна нулю, то его кинетическая энергия в момент достижения мишени

$$W = 0,5m_e v^2 = eU, \quad (10.1)$$

где  $m_e$ ,  $v$ ,  $e$  – соответственно масса, скорость и заряд электрона;  $U$  – разность потенциалов между катодом и мишенью (анодом).

можно оценить в ангстремах как  $\lambda_{\min} = hc/eU = 12398/U$ , где  $U$  – ускоряющее напряжение рентгеновской трубки в вольтах.

Большинство электронов в пучке взаимодействует с электронами, связанными с атомами мишени. Для выбивания электрона из атомов требуется лишь часть энергии налетающих электронов. После того как налетающий электрон утрачивает часть своей энергии, энергия, трансформируемая в рентгеновский фотон, оказывается меньше, чем  $eU$ . Генерируемый таким образом фотон имеет длину волны, превышающую  $\lambda_{\min}$ . Обычно испускается излучение, состоящее из фотонов с разной длиной волн. Спектр такого излучения при больших ускоряющих напряжениях (свыше 100 кВ) является в основном непрерывным.

## 2 Изменение энергетического состояния электронов атома.

Оно приводит к выходу из атома фотонов характеристического излучения. При некоторых, определенных для данного материала анода, ускоряющих напряжениях на фоне непрерывного спектра возникает линейчатый (характеристический) спектр (рисунок 10.8).

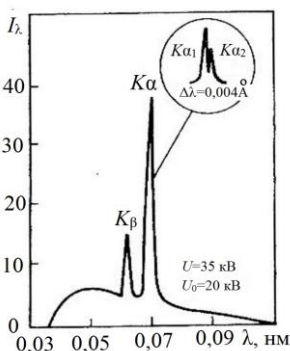


Рисунок 10.8 – Коротковолновая часть характеристического спектра излучения Mo

Характеристическое излучение возникает тогда, когда падающий электрон обладает энергией достаточной для того, чтобы выбить электрон с одной из внутренних электронных оболочек атома, в этом случае вакантное место занимает электрон с более высокого энергетического уровня, а избыток энергии реализуется в виде излучения. Длина волны рентгеновского кванта будет определяться только разностью энергий этих двух уровней, и повышение напряжения увеличивает интенсивность, но не изменяет длину волны характеристического излучения анода.

Характеристические спектры весьма просты и классифицируются в порядке возрастания длин волн как  $K$ -,  $L$ -,  $M$ -

$N$ -серии в соответствии с уровнем, с которого был выбит электрон.

## 3 Переходы между энергетическими уровнями ядер.

Каждое ядро, как и атом, обладает определенным набором энергетических уровней; переход с одного уровня на другой с более низкой энергией сопровождается выделением энергии, например, в виде фотонного излучения. Поскольку энергетические уровни в ядрах и атомах дискретны, фотонное излучение в указанных выше процессах испускается в виде отдельных спектральных линий. Такое испускание обычно происходит в возбужденных дочерних ядрах после  $\alpha$ - или  $\beta$ -распада материнского ядра. Возбужде-

ние ядер может произойти также после взаимодействия ядра с нейтроном, с гамма-квантом или с другими частицами большой энергии (больше нескольких МэВ). Источниками таких фотонов в радиационной технике являются, например, такие радионуклиды, как  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$  (рисунок 10.9).

В каждом из этих случаев фотоны испускаются дочерними возбужденными ядрами  $^{137}\text{Ba}$  и  $^{60}\text{Ni}$  после  $\beta$ -распада материнских ядер.

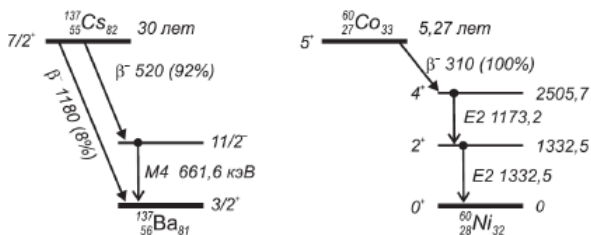


Рисунок 10.9 – Схемы распада и  $\gamma$ -переходы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$

### 10.2.2 Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

При прохождении через вещество интенсивность рентгеновского и гамма-излучения уменьшается по закону, характерному для электромагнитного излучения (закон Ламберта-Бугера):

$$I = I_0 \exp(-\mu x), \quad (10.2)$$

где  $I$  и  $I_0$  – конечная и начальная интенсивности излучения, соответственно;  $\mu$  – полный линейный коэффициент ослабления;  $x$  – толщина слоя вещества.

Коэффициент  $\mu$  зависит от длины волны и плотности поглощающего материала. Чтобы  $\mu$  не зависел от физического состояния вещества, вводят массовый коэффициент ослабления  $\mu_p = \mu/\rho$  ( $\rho$  – плотность вещества).

Полный линейный коэффициент ослабления  $\mu = \tau + \sigma + \pi$ , где  $\tau$  – линейный коэффициент фотоэффекта,  $\sigma$  – линейный коэффициент Комптона,  $\pi$  – линейный коэффициент образования электрон-позитронных пар ( $E_\gamma \geq 1,02$  МэВ). Коэффициенты  $\tau$ ,  $\sigma$ ,  $\pi$  зависят от атомного номера вещества  $Z$  и энергии ионизирующего электромагнитного излучения  $E_\gamma$  (рисунок 10.10).

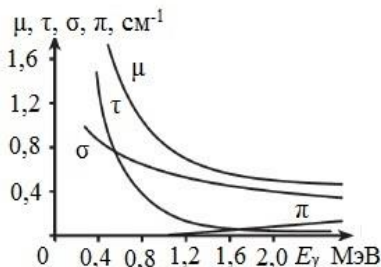


Рисунок 10.10 – Зависимость коэффициентов поглощения и рассеяния для свинца от энергии фотонов

При малых энергиях (до 100 кэВ) ионизирующего излучения вид зависимости линейного коэффициента ослабления от энергии излучения усложняется.

Заметный вклад дает резонансное взаимодействие фотонов с атомом, которое приводит к появлению спектральной структуры в зависимости поглощения от энергии фотонов (рисунок 10.11). На этой кривой наблюдается несколько «скачков». Природу этих «скачков» можно понять, рассматривая изменение  $\mu_p$ . По мере уменьшения длины волны сначала наблюдается уменьшение коэффициента поглощения, но при достижении определенной длины волны, например,  $\lambda_{L111}$ , возникает резкий скачок  $\mu_p$ .

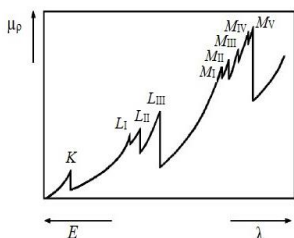


Рисунок 10.11 – Зависимость коэффициента поглощения  $\mu_p$  рентгеновского излучения от длины волны  $\lambda$

Одновременно с появлением скачка поглощения усиливается эмиссия фотоэлектронов и в спектре рассеянных лучей появляются линии вторичного характеристического излучения. Появление скачков объясняется тем, что энергия квантов рентгеновского излучения становится достаточной для ионизации электронов с определенного энергетического уровня атомов поглощающего вещества. Появление линий вторичного характеристического излучения связано

с излучением квантов при переходах электронов атома на освободившиеся внутренние уровни. При дальнейшем уменьшении длины волны наблюдается еще несколько скачков  $\mu_p$ : при  $\lambda_{L11}$ ,  $\lambda_{L1}$  и  $\lambda_K$ . Каждый из этих скачков связан с ионизацией определенного энергетического уровня. В пределах между двумя соседними скачками коэффициент  $\mu_p \sim \lambda^3$ .

## 10.3 Радиография

### 10.3.1 Основы радиографического метода

**Радиография** (от лат. *radio* – излучаю и греч. *grapho* – пишу), метод неразрушающего контроля сплошности твердых тел, основанный на просвечивании объекта ионизирующим (иногда и нейтронным) излучением и регистрации фотографическим методом прошедшего через объект излучения.

В зависимости от способа регистрации и типа детектора различают два основных метода радиографии: *прямой экспозиции* и *переноса изображения*.

В методе прямой экспозиции используются источники ионизирующего излучения практически всех видов, просвечивание изделий производится на радиографическую пленку. Этот метод является наиболее распространенным методом промышленной радиографии.

Метод переноса изображения применяют при *нейтронной* и *электрорадиографии*. В первом случае скрытое изображение получают на промежуточном металлическом активируемом экране, размещенном за изделием в нейтронном потоке. После этого скрытое изображение переносят на радиографическую пленку, прикладывая ее к металлическому экрану.

При *электрорадиографии* в качестве промежуточного носителя скрытого изображения используют электрически заряженные полупроводниковые пластины, помещаемые за объектом в пучке ионизирующего излучения, а в качестве регистратора видимого изображения применяют обычную бумагу, на которой изображения проявляются с помощью сухих красящих веществ.

*Рентгенография* – это метод получения на рентгеновской пленке изображения предмета, просвечиваемого рентгеновским излучением.

В качестве детектора прошедшего излучения используют рентгенографические пленки, в т. ч. цветные, специальные ядерные фотоматериалы.

Источник излучения располагается с одной стороны, а кассета с рентгеновской пленкой – с другой (рисунок 10.12).

Прошедшее через исследуемый объект излучение вызывает почернение фотоэмульсии, причем оптическая плотность изображения при прочих равных условиях будет тем выше, чем тоньше поглощающий слой. Поэтому против тех участков твердого тела, где имеются пустоты, газовые включения или другие подобные дефекты, плотность почернения выше, чем против участков, где дефектов нет.

Снимок объекта, полученный просвечиванием рентгеновским излучением, называют рентгенограммой (*R*) или рентгеновским (*R*) снимком (для  $\gamma$ -излучения – соответственно  $\gamma$ -граммой или  $\gamma$ -снимком).

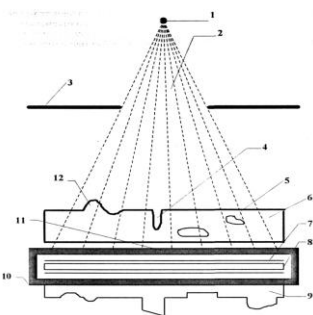


Рисунок 10.12 – Схема радиографирования материала:  
 1 – источник излучения; 2 – поток рентгеновского или  $\gamma$ -излучения;  
 3 – диафрагма, ограничивающая конус излучения; 4 – впадина на поверхности детали; 5 – воздушная полость;  
 6 – просвечиваемый объект;  
 7 – усиливающие экраны; 8 – пленка;  
 9 – эпюра интенсивности излучения на выходе из просвечиваемого объекта;  
 10 – кассета; 11 – включение, плотнее основного материала; 12 – утолщение

### 10.3.2 Методика и техника радиографического контроля

#### Выбор источников излучения

Для радиографического контроля в промышленности в качестве источников излучения широко применяют рентгеновские аппараты, дефектоско-

пы, в которых используют радионуклиды, испускающие  $\gamma$ -кванты:  $^{137}\text{Cs}$  (цезий),  $^{192}\text{Ir}$  (иридий),  $^{60}\text{Co}$  (кобальт),  $^{75}\text{Se}$  (селен),  $^{170}\text{Tm}$  (тулий) и др.), реже – испускающие  $\beta$ -частицы:  $^{147}\text{Pr}$  (празеодим),  $^{204}\text{Tl}$  (таллий),  $^{90}\text{Sr}$  (стронций),  $^{90}\text{Y}$  (иттрий) и др.), ускорители.

При выборе источника излучения сначала, в соответствии со схемой радиографического контроля, устанавливают толщину, атомный номер и плотность просвечиваемого материала.

Затем с учетом конструктивных особенностей изделия и условий контроля (таблица 10.2) определяют тип необходимого источника и основную характеристику – энергию излучения (напряжение на рентгеновской трубке), радиоактивный источник, энергию ускоренных электронов для бетатронов.

**Таблица 10.2 – Область применения радиографического метода при использовании рентгеновских аппаратов**

Толщина просвечиваемого металла, мм				Толщина просвечиваемого неметалла со средним атомным номером (плотностью, г/м <sup>3</sup> ), мм			Напряжение на рентгеновской трубке, кВ
Fe	Ti	Al	Mg	14 (1,4)	6,2 (1,4)	5,5 (0,9)	
0,04	0,1	0,5	1,5	1	10	15	20
0,4	1	5	14	8	70	100	40
0,7	2	12	22	17	95	135	50
1	3	20	35	25	120	170	60
2	6	38	57	–	–	–	80
5	10	54	80	–	–	–	100
7	18	59	105	–	–	–	120
10	24	67	120	–	–	–	150
21	47	100	160	–	–	–	200
27	57	112	200	–	–	–	250
33	72	132	240	–	–	–	300
46	106	210	310	–	–	–	400
150	265	430	650	–	–	–	1000

### Выбор рентгеновских пленок

При радиографическом методе контроля предпочтительным детектором излучения с точки зрения высокой чувствительности к дефектам является рентгенографическая пленка. Ксерорадиографические пластины и фотобумага применяются для контроля менее ответственных изделий.

Качество радиографического контроля зависит от правильности выбора **рентгеновских пленок и усиливающих экранов.**

Радиографические пленки реагируют на прошедшее через объект излучение. В процессе экспонирования изменяются параметры чувствительного слоя, обеспечивая регистрацию изменения интенсивности



излучения. Пленки обладают интегрирующей способностью регистрировать чрезвычайно низкие потоки излучения за длительное время просвечивания в широком диапазоне энергий. Фотографическая эмульсия содержит чувствительную к излучению галоидную соль серебра (обычно бромистое серебро с небольшой примесью йодистого), равномерно в виде зерен распределенную в тонком слое желатина.

При выборе пленки необходимо учитывать, что для выпускаемых рентгенографических пленок с повышенным коэффициентом контрастности и разрешающей способности, т. е. с повышением чувствительности к дефектам, падает чувствительность к излучению (возрастает время просвечивания).

Рентгеновская пленка обеспечивает высокую чувствительность к дефектам. При ее выборе необходимо учитывать контрастность, чувствительность к излучению и разрешающую способность.

Радиографические пленки по способу применения делятся на *экранные* и *безэкранные*.

*Безэкранные* пленки имеют мелкозернистую структуру эмульсии, что увеличивает разрешающую способность, поэтому используются без усиливающих экранов или с металлическими экранами.

*Экранные* пленки используются с флуоресцентными экранами, между которыми при экспонировании помещают пленку. Они имеют одно очень важное достоинство в сравнении с безэкранными пленками – **сокращение времени экспозиции**. Однако из-за крупнозернистости люминофора экрана его собственная нерезкость не позволяет получить высокую чувствительность снимков, поэтому **экранные пленки используются только для контроля малоответственных изделий**.

По чувствительности к дефектам и излучению рентгенографические пленки делят на 4 класса:

1) особо мелкозернистые и высококонтрастные безэкранные пленки, обеспечивающие наивысшую чувствительность к дефектам с коэффициентом контрастности 4;

2) мелкозернистые высококонтрастные безэкранные пленки (уступают по чувствительности приблизительно на 30 % первым), применяются с металлическими экранами или без них;

3) высокочувствительные к излучению (в 5–10 раз время просвечивания меньше в сравнении с пленкой 1-го класса) безэкранные пленки;

4) высокочувствительная к излучению экранная пленка с использованием люминесцентных экранов (время просвечивания сокращается примерно в 10–100 раз в сравнении с пленками 1-го класса).

Время просвечивания должно обеспечить получение снимков с оптической плотностью почернения 1,5–3,0 и составлять несколько минут. Для

сокращения времени просвечивания применяют усиливающие экраны (свинцовые, оловянные, свинцово-оловянные фольги толщиной 0,02–0,05 мм, люминесцентные кальций-вольфрамовые свинцово-баритовые, цинк – кадмий-сульфидные). В настоящее время используются пленки РТ-6М, РТ-1, РНТМ-1, РТ-СШ, РТ-4М, РТ-СЗ, РТ-5, РТ2 (производство РФ) и других производителей с экраном и без. Рентгенографические пленки экранного типа необходимо применять во всех случаях, если только при этом удастся выявлять недопустимые по ТУ дефекты.

Если на снимках, полученных на пленках экранного типа, недопустимые дефекты не выявляются, то последовательно переходят к пленкам марки РТ-1, РТ-4М или РНТМ-1 и РТ-5. Последние применяют для контроля изделий ответственного назначения. Это выявление мелких дефектов типа трещин в сварных, паяных и клепаных соединениях в процессе производства, а также усталостных толщин в процессе эксплуатации.

Радиографические пленки и усиливающие экраны помещают в кассеты. Кассеты изготавливаются из материалов с низким коэффициентом ослабления излучения, обеспечивают защиту от света, влажности и механических повреждений.

При просвечивании применяют также цветные радиографические пленки, которые принципиально ничем не отличаются от обычных фотопленок, но обладают большой чувствительностью к рентгеновскому излучению и состоят из двух или трех эмульсионных слоев. Каждый слой имеет свой коэффициент контрастности и чувствительности, благодаря чему определяется изменение цвета и яркости изображения при изменении толщины или плотности образцов. К таким пленкам относится цветная рентгеновская пленка РЦ-2. Для сокращения экспозиции и уменьшения влияния рассеянного излучения применяют металлические и флуоресцентные усиливающие экраны. Обычно используют комбинации флуоресцентного (передний) и металлического (задний) экранов.

### **Выбор усиливающих экранов и схемы зарядки кассет**

В соответствии с ГОСТ 7512–82 [86] время просвечивания должно обеспечивать получение снимков с оптической плотностью почернения 1,5–3,0. Как правило, время просвечивания не должно превышать нескольких минут. Для сокращения времени можно либо уменьшить фокусное расстояние, либо повысить интенсивность и энергию излучения, либо применять усиливающие экраны, что делается чаще.

В радиографии применяют следующие усиливающие экраны:

а) металлические усиливающие в виде свинцовых, оловянных и оловянисто-свинцовых фольг толщиной 0,02–0,05 мм, свинцовые SMP-308 [85].

Основное предназначение экрана – уменьшение времени экспозиции рентгеновского аппарата и обеспечение высокой контрастности изображения. Благодаря этому процесс радиологического исследования значительно упрощается и ускоряется. Состав свинцовой фольги экранов: Pb = 96 %, Sn  $\approx$  1,5 %, Sb  $\approx$  2,5 %;

б) люминесцентные усиливающие экраны кальций-вольфрамовые, свинцово-баритовые, цинк – кадмий-сульфидные KYOKKO Super Special (коэффициент передачи контраста для двух пар линий/мм  $\geq$  0,4);

в) металлофлюоресцентные усиливающие экраны (СМП-1). Использование таких экранов с высокочувствительной радиографической пленкой позволяют получить высококачественное рентгеновское изображение и сократить продолжительность экспозиции при проведении рентгеновской дефектоскопии.

Усиливающие экраны СМП-1 используются как при просвечивании на источники излучения с постоянным напряжением (РПД, СБК, МАРТ, Egescio и т. д.), так и при использовании в качестве источников излучения импульсных рентгеновских аппаратов (АРИНА, ПАМИР, АРИОН и т. д.). Коэффициент сокращения экспозиции – 20–40 раз (KYOKKO High Plus, RCF-CAWO 300  $\times$  400 с эмиссией в УФ, фиолетовой и синей областях).

Усиливающее действие металлических экранов вызывается фотоэлектронами и электронами отдачи, освобождаемыми рентгеновским и излучением из фольги. При этом данной энергии рентгеновского и  $\gamma$ -излучения соответствует оптимальная толщина фольги.

Если толщина фольги меньше длины пробега фотоэлектронов, коэффициент преобразования энергии рентгеновского и  $\gamma$ -излучения в кинетическую энергию электронов и электронов отдачи уменьшается, если больше, то это приводит к ослаблению интенсивности рентгеновского и  $\gamma$ -излучения, и усиливающее действие металлического экрана уменьшается.

Усиливающее действие люминесцентных экранов обусловлено воздействием на пленку светового излучения, возникающего в люминофоре под действием рентгеновского и  $\gamma$ -излучения.

Усиливающее действие металлических и люминесцентных экранов характеризуется коэффициентами усиления.

*Коэффициентом усиления экрана* называют отношение времени без усиливающего экрана ко времени просвечивания с экраном при получении R- и  $\gamma$ - снимков с заданной оптической плотностью. При оптической плотности 1,5–3,0 и оптимальной толщине экранов коэффициент усиления металлических экранов  $\approx$  2.

Коэффициент усиления люминесцентных экранов изменяется в широких пределах в зависимости от типа экрана, нагрузки светосостава, типа рентге-

нографической пленки, энергии и интенсивности излучения, режимов фотообработки и т. д. Наибольший коэффициент усиления достигается при использовании специальных экранных пленок.

Металлические усиливающие экраны обеспечивают более четкое изображение дефектов снимка как по сравнению со снимком, полученным с применением люминесцентных экранов, так и без экранов.

При зарядке кассет радиографическую пленку помещают в кассету с использованием следующих схем зарядки: 1) без экранов; 2) между двумя металлическими экранами; 3) между двумя флюоресцентными экранами; 4) между парами экранов, каждая из которых состоит из одного металлического и одного флюоресцентного экрана. В последнем случае к пленке прикладывается флюоресцентный экран.

На практике находят применение следующие варианты зарядки кассет (по ходу излучения): КПК, КПКМ, КЛПЛК. Здесь приняты следующие обозначения: К – стенка кассеты, М – металлический усиливающий экран, Л – люминесцентный рентгеновский экран, П – рентгеновская пленка.

Для просвечивания узлов и деталей переменной толщины в труднодоступных местах допускается заряжать по две пленки разной чувствительности к излучению в одну кассету, например, по схемам: КППК, КМППМК, КМППМК, КЖШЛПЛК.

Размер кассеты и рентгенографической пленки определяются размерами площади контролируемого участка.

Во время зарядки и разрядки кассет следует осторожно обращаться с пленкой. Нельзя класть пленку на стол, не подложив под нее чистую бумагу, а также брать пленку влажными или потными руками, держать ее в плотно сжатых пальцах продолжительное время.

Металлические усиливающие экраны должны быть хорошо разглажены, на них не должно быть видимых царапин, рваных участков и т. п. Чтобы обеспечить плотное прилегание к пленке люминесцентных экранов, следует использовать специальные жесткие или вакуумные кассеты.

### **Выбор оптимальной схемы контроля и фокусного расстояния**

Сварные соединения, применяемые в различных конструкциях, просвечиваются по типовым схемам (рисунок 10.13), где стрелки показывают направление оси пучка излучения, который должен проходить через середину контролируемого шва.

Изделия большого диаметра в целях повышения производительности следует просвечивать изнутри через одну стенку за одну экспозицию.

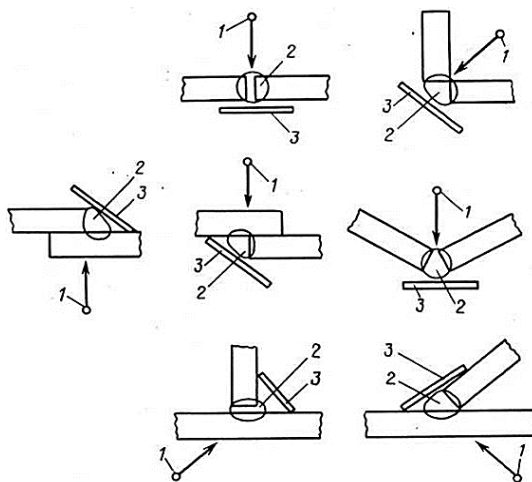


Рисунок 10.13 – Типовые схемы просвечивания стыковых, угловых, нахлесточных и тавровых соединений:

1 – источник излучения; 2 – контролируемый участок; 3 – кассета с пленкой

В соответствии с ГОСТ 7512–82 [86] расстояние от источника излучения до контролируемого объекта следует выбирать таким, чтобы при просвечивании выполнялось следующее требование: геометрическая нерезкость изображений дефектов на снимках при расположении пленки вплотную к контролируемому объекту не должна превышать половины требуемой чувствительности контроля при чувствительности до 2 мм и 1 мм – при чувствительности более 2 мм.

Геометрическую нерезкость определяют по формуле

$$U_{\Gamma} = \frac{\Phi d}{F - d}, \quad (10.3)$$

где  $\Phi$  – максимальные размер фокусного пятна источника, мм,  $d$  – максимальная толщина контролируемой зоны в направлении источника излучения (радиационная толщина);  $F$  – фокусное расстояние (расстояние от источника излучения до пленки).

Фокусное расстояние не является в радиографии какой-то постоянной величиной. В зависимости от габаритов изделия оно может меняться весьма значительно. Однако в качестве ориентировочных средних значений для рентгеновских аппаратов и  $\gamma$ -дефектоскопов можно принять значение фокусного расстояния 50–75 см.

В соответствии с ГОСТ 7512–82 [86] минимальное фокусное расстояние  $F$  при просвечивании плоских участков рассчитывают по формулам

$$F = \left[ \frac{\Phi}{U_r} \right] + (d + H), \quad (10.4)$$

$$F \geq 5d + H,$$

где  $H$  – расстояние от пленки до обращенной к пленке поверхности контролируемого образца.

### Режимы просвечивания рентгеновским излучением

Режимы просвечивания (экспозиция, ускоряющее напряжение) излучением рентгеновских аппаратов непрерывного действия изделий и сплавов на основе железа, титана, алюминия и магния определяются по соответствующим номограммам (рисунок 10.14) и контролируют с учетом материала изделия и условия его просвечивания, а также качества применяемых рентгеновских пленок, усиливающих металлических и люминесцентных экранов и других факторов.

Время экспозиции зависит от многих параметров, поэтому его сложно рассчитать. Номограммы составляют экспериментально для каждого рентгеновского аппарата, источника  $\gamma$ -излучения и ускорителя электронов.

Сами графики экспозиций (номограммы) представляют собой зависимости экспозиции, обычно выражаемой в единицах  $\text{мА} \cdot \text{мин}$  (ч) от контролируемой толщины для различного напряжения на рентгеновской трубке (например, через 20 кВ), и не позволяют однозначно установить требуемое напряжение.

Из нескольких возможных значений напряжения дефектоскопист должен выбрать оптимальное, т. е. то, при котором

достаточный контраст изображения реализуется за приемлемое время (5–10 мин) экспонирования объекта.

### Последовательность операций перед просвечиванием и вспомогательные технические средства

Перед просвечиванием образцов выполняются следующие операции.

- 1 Определение участков и схем просвечивания.
- 2 Выбор источников излучения, типа рентгенографической пленки, усиливающих экранов.
- 3 Определение режимов просвечивания (напряжение на рентгеновской трубке и силы тока) фокусного расстояния, время просвечивания).

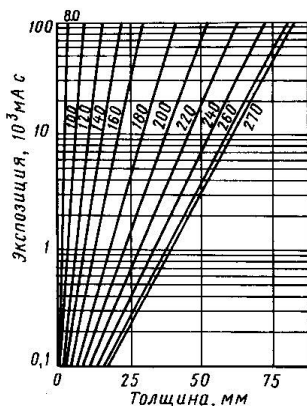


Рисунок 10.14 – Номограмма для определения экспозиции и ускоряющего напряжения рентгеновской трубки

При контроле сварных соединений необходимо просвечивать не только сварной шов, но и всё сварное соединение с учетом зоны термического влияния.

- 4 Зарядка кассеты.
- 5 Установка кассет, маркировочных знаков, эталонов чувствительности.
- 6 Защита кассет от действия рассеянного излучения.
- 7 Проведение мероприятий по защите людей от воздействия ионизирующего излучения, по обеспечению электро- и пожаробезопасности.
- 8 Подготовка к включению рентгеновского аппарата.

Места на образцах, подлежащие контролю, размечают цветным карандашом или мелком на отдельные участки, соответствующие размеру снимка, и маркируют условными обозначениями. Маркировочные знаки (цифры, буквы, стрелки) изготавливают в соответствии с ГОСТ 7512–82 [86]. При повторном контроле на данном участке ставят букву «П».

Чувствительность контроля, мм, оценивается по эталонам (рисунки 10.15, 10.16):

- проволочные – по диаметру  $d_{\min}$  наименьшей различимой проволоки.
- канавочные – по глубине  $h_{\min}$  явно выявленной на снимке наименьшей канавки.
- пластинчатые – по наименьшей толщине  $h_{\min}$  эталона, на изображении которого явно видно отверстие с диаметром, равным удвоенной толщине эталона.

Отметим, что на практике, при контроле по ГОСТ 7512–82, пластинчатые эталоны применяются достаточно редко. Более широкое применение данный тип эталонов нашел при контроле по международным и американским стандартам EN ISO 19232–2, ASTM E 1025 и ASTM E–1742.

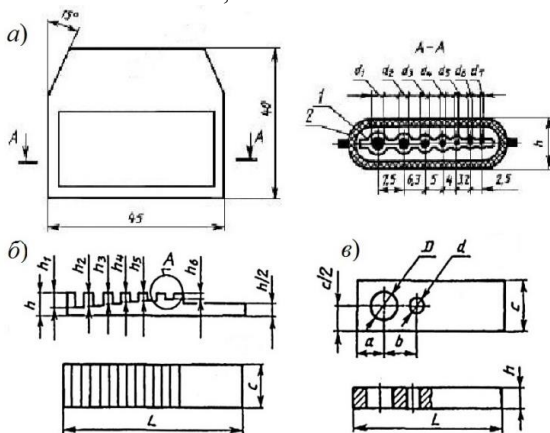


Рисунок 10.15 – Форма и размеры эталонов чувствительности для радиографического контроля:

*a* – проволочные; *б* – канавочные; *в* – пластинчатые

В соответствии с требованиями ГОСТ 7512–82 эталоны чувствительности следует изготавливать из металла или сплава, который по своему химическому составу аналогичен контролируемому изделию. В случае, если это невозможно по техническим или экономическим причинам, эталон чувствительности допускается изготавливать из материала, который имеет такое же радиографическое поглощение, как и контролируемый объект.



Рисунок 10.16 – Пример расшифровки результатов радиографического контроля с использованием канавчатого эталона

Чувствительность контроля (наименьший диаметр выявляемой на снимке проволоки проволочного эталона, наименьшая глубина выявляемой на снимке канавки канавчатого эталона, наименьшая толщина пластинчатого эталона, при которой на снимке выявляется отверстие с диаметром, равным удвоенной толщине эталона), не должна превышать значений, указанных в ГОСТ 7512–82.

При проведении просвечивания кассету с пленкой необходимо защитить от постороннего рассеянного и вторичного излучения с задней стороны листовым свинцом толщиной 1–3 мм или другими эквивалентными ма-

териалами соответствующей толщины.

Заряженные кассеты вместе со свинцовым листом закрепляют на контролируемом объекте с помощью приспособлений, обеспечивающих плотное прилегание кассет к просвечиваемому участку. При просвечивании плоских деталей в стационарных условиях кассету укладывают на специальный стол, покрытый листовым окрашенным свинцом, либо на свинцовый лист размерами не менее поля облучения. При просвечивании кассеты вместе со свинцовыми листами плотно прижимают к контролируемому участку. Источник излучения и контролируемый объект с прижатой к нему кассетой во время просвечивания должны находиться в условиях, исключающих их сотрясение и вибрацию.

### **Химико-фотографическая обработка экспонированной рентгеновской пленки и ее хранение**

После экспонирования пленку подвергают химико-фотографической обработке, включающей в себя проявление, ополаскивание в воде фиксирование, промывку в непроточной воде, окончательную в проточной воде и сушку снимка.

Источник неактивного освещения должен находиться на расстоянии  $\geq 50$  см от пленки. Время воздействия неактивного освещения на пленку не должно превышать шести минут.



Способ приготовления проявителя и фиксажа и их состав указаны в рецептах завода, изготовляющего пленку.

Свежеприготовленный проявитель обладает повышенной вуалирующей способностью. Пользоваться им следует не раньше чем через 12 ч после приготовления.

Пленку следует проявлять в бачке, закрепляя в вертикальном положении с помощью рамок. Кюветное (горизонтальное) проявление допускается, когда объем работы составляет несколько снимков за смену. Во избежание слипания пленок и неравномерного проявления кюветы следует покачивать в течение всего времени проявления.

Время проявления зависит от истощенности и температуры проявителя.

Допустимые температуры используемых растворов указываются в эскизах химико-фотографической обработки пленки.

При работе с рентгенографической пленкой необходимо соблюдать правила ее безопасного хранения. Рентгенографическая пленка плохо воспламеняется, но при горении выделяет ядовитые газы.

В технических условиях на рентгенографические пленки указываются условия их хранения (на стеллажах в вентилируемом помещении при определенной температуре и относительном расстоянии от отопительных приборов и от пола, они должны быть защищены от воздействия прямых солнечных лучей, вредных для пленки газов: сероводорода, ацетилена, аммиака и т. п.).

Нельзя хранить пленку в помещениях, где находятся радиоактивные вещества и светосоставы постоянного действия. После окончательной промывки пленки сушат при комнатной температуре в течение 3–4 ч. При этом пленки следует подвешивать с помощью зажимов к рейкам, проволокам, капроновым нитям и т. п.

Неправильное обращение с пленкой, ошибки в химико-фотографической обработке вызывают появление на радиографических снимках дефектов, затрудняющих расшифровку радиографических снимков, а иногда делают невозможной. К таким дефектам относятся вуаль, светлые и темные пятна, царапины, следы пальцев, потеки и др. Расшифрованные снимки хранятся в качестве документа о контроле в течение времени, определяемого назначением и условиями эксплуатации изделий. После этого срока из пленок извлекают и сдают серебросодержащие отходы.

### **Расшифровка радиографических снимков и разбраковка образцов сварных соединений**

Оценка качества и разбраковка узлов и образцов сварных соединений по радиографическим снимкам должна производиться в соответствии с действующими ТУ, ГОСТ, ОСТ, чертежами и другой нормативно-технической документацией.

Перед расшифровкой следует оценить качество снимка с точки зрения отсутствия на нём дефектов, вызванных неправильной химико-фотографической обработкой. Затем следует оценить оптическую плотность снимка, которая по ГОСТ 7512–82 [87] должна быть 1,5–3,0; проверить, видны ли по снимку элементы эталонов чувствительности, гарантирующие не выявление недопустимых дефектов; есть ли на снимке изображение маркировочных знаков. Если эти условия не выполняются, то снимки к расшифровке не принимаются, а просвечивание повторяют. Заключение дают по результатам расшифровки снимков. Снимки расшифровывают в сухом виде на негатоскопе<sup>1)</sup>.

Чтобы обеспечить различение мелкоконтрастных изображений, экран негатоскопа должен иметь следующие минимальные значения яркости при просмотре с оптической плотностью: 1,0–300 кд/м<sup>2</sup>; 2,0–3000 кд/м<sup>2</sup>; 3,0–30000 кд/м<sup>2</sup>. Эти значения яркости даны из расчета создания яркости за снимком 30 кд/м<sup>2</sup>. Требуемые значения яркости для промежуточных значений оптической плотности можно определить путем интерполяции.

Поле просмотра снимка диафрагируют с помощью шторок негатоскопа либо накладных диафрагм. Диафрагмирование приобретает особое значение при просмотре снимков, имеющих участки значительно меньшей плотности, чем на всей проконтролированной площади.

Расшифровывают радиографические снимки в слегка затемненном помещении или в экранированной от воздействия прямого света части помещения, избегая появления бликов на анализируемом изображении. Максимальное удаление глаз от экрана негатоскопа не должно превышать 400 мм.

Расшифровке подлежат внутренние дефекты (нарушения сплошности или однородности материала). Для этого необходимо обладать достаточными знаниями особенностей технологического процесса, продукция которого подлежит контролю.

На снимке должны отсутствовать дефекты пленки (царапины, риски и т. п.) и дефекты, вызванные неправильной химико-фотографической обработки пленок (вуаль, светлые участки от брызг фиксажа на сухую пленку, прилипания пузырьков воздуха к пленке во время проявления, следы пальцев и т. п.; темные участки из-за засветки пленки, следы электрических разрядов от трения пленки, потеки и др.).

При анализе радиографических снимков надо учитывать следующее. Дефекты, которые увеличивают путь, проходимый излучением (выплески металла, брызги), либо представляют собой включения материала с большим коэффициентом ослабления излучения, чем основной металл (например, вольфрам), выявляются в виде светлых участков.

---

<sup>1)</sup> *Негатоскоп* – устройство для просмотра снимков, состоящее из осветителя большой мощности, матового экрана, диффузионно-рассеивающего свет, регулятора яркости, шторок для ограничения размеров поля просмотра и вентиляторов для охлаждения экрана.

Дефекты, которые уменьшают путь, проходимый излучением в контролируемом металле (несплошности: трещины, непровары, поры и т. д.), либо представляют собой включения материала с меньшим коэффициентом ослабления излучения, чем основной металл (шлаковые включения), выявляются в виде темных участков, представляющих собой проекции дефектов в направлении просвечивания на плоскость рентгеновской пленки).

Так, трещины выявляются в виде темных тонких, иногда разветвленных извилистых линий. Непровары имеют вид темных пятен округлой формы, шлаковые включения – пятен и точек неправильной формы и т. д.

Определение *лучевого размера дефектов*<sup>1)</sup> может производиться путем измерения плотности почернения изображения дефекта на снимке с помощью денситометра, т. к. она изменяется в зависимости от величины дефектов. Измерение величины дефектов по плотности почернения их изображений без специальных приспособлений дает лишь весьма приближенные результаты.

Для определения лучевых размеров дефектов может быть также применен метод сравнения эталонных снимков со снимками, полученными при просвечивании изделий. Для этого необходимо иметь набор эталонных снимков с различными дефектами, расположенными на различной глубине материала при различной его толщине. Образцы с дефектами, предназначенные для получения эталонов, должны быть изготовлены из опытных изделий, полученных с той же технологией, с которой изготавливаются сами изделия, подвергающиеся просвечиванию. Опытные образцы изделий после просвечивания разрезаются в месте расположения дефектов с целью измерения действительной их величины.

Сравнивая визуально или при помощи фотометра плотность почернения той или иной канавки с плотностью почернения изображения дефекта, полученного на той же пленке, можно определить лучевой размер дефекта.

Для более точного визуального определения величины дефектов таким способом при толстостенных металлах необходимо всё же изготовить несколько эталонных снимков и уточнить по ним результаты определений.

## **10.4 Радиометрия**

### **10.4.1 Основы радиометрического метода контроля**

Сущность радиометрического метода заключается в просвечивании объекта путем его сканирования коллимированным<sup>2)</sup> пучком излучения и по-

---

<sup>1)</sup> *Лучевой размер дефекта* – размер дефекта в направлении просвечивания (прохождения ионизирующего излучения).

<sup>2)</sup> *Коллиматор* (от *collimo*, искажение правильного лат. *collineo*, – направляю по прямой линии) – устройство для получения параллельных пучков лучей света или частиц.

следующем преобразовании детектором прошедшего излучения в электрический сигнал (рисунок 10.17).

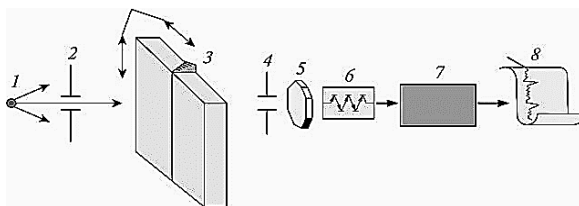


Рисунок 10.17 – Схема радиометрического метода контроля

1 – источник; 2, 4 – коллиматоры; 3 – контролируемый объект; 5 – сцинтилляционный чувствительный элемент; 6 – фотоумножитель; 7 – усилитель; 8 – регистрирующее устройство

Коллиматоры для получения приблизительно параллельных пучков ионизирующего излучения представляют собой длинное отверстие с той или иной формой поперечного сечения, проделанное в поглощающем материале (рисунок 10.18). Например, коллиматор  $\gamma$ - или рентгеновского излучения может быть отверстием в свинцовом поглотителе. На одном из концов коллиматора находится источник излучения.



Рисунок 10.18 – Простейший коллиматор излучения

После обработки сигнала результаты контроля представляются регистрирующим устройством в виде записи на диаграммной ленте, цифрового кода, отклонения стрелки на гальванометре и т. п. При наличии дефектов или

других отклонений в объекте детектор и регистрирующее устройство отмечают изменение потоков излучения.

Источником излучения в радиометрическом контроле в основном служат **радиоактивные источники**. В качестве блока детектирования могут быть использованы ионизационные камеры, газоразрядные счетчики, полупроводниковые и сцинтилляционные детекторы.

Сцинтилляционные детекторы получили наибольшее распространение благодаря высокой эффективности регистрации излучения и большим предельным допустимым нагрузкам. В случае сцинтилляционного детектора часть фотонов из коллимированного пучка излучения может пройти сцинтиллятор, например, кристалл  $\text{Na}(\text{Tl})\text{I}$ , без взаимодействия, потерять в кристалле часть своей энергии и выйти из него или, наконец, потерять свою энергию. Поглощенная часть энергии фотонов преобразуется в сцинтилляторе в световую вспышку, которая с помощью ФЭУ преобразуется в электрический сигнал. Амплитуда импульса напряжения на выходе ФЭУ

характеризует долю поглощенной энергии фотонов. По своему распределению одна часть импульсов определяется вкладом комптоновского поглощения, другая – фотоэлектрического (фотопик).

Для моноэнергетического первичного излучения фотопик означает регистрацию фотонов, не проваимодействовавших с объектом, но полностью поглощенных сцинтиллятором. Комптоновская часть означает регистрацию фотонов, рассеянных в объекте и поглощенных в веществе сцинтиллятора. Для немонэнергетического первичного излучения распределение импульсов с ФЭУ носит более сложный характер.

Обработка сигналов производится электронными средствами с целью выделения информации о контролируемом параметре. Полный сигнал кроме этой полезной информации несет в себе составляющие сигнала, соответствующие изменениям формы (толщины) самого контролируемого объекта.

Выходными регистрирующими устройствами могут быть как показывающие приборы (миллиамперметр, счетчик импульсов, осциллограф), так и записывающие (с документированием результатов контроля): самопишущие потенциометры и цифропечатающие устройства – в случае использования в канале обработки сигнала вычислительных машин.

#### **10.4.2 Классификация методов**

Методы радиометрии можно сгруппировать по различным классификационным признакам.

1 По *характеру измеряемой величины* различают *радиометрическую дефектоскопию* и *толщинометрию*. Отличия дефектоскопии от толщинометрии обусловлены различным характером решаемых задач.

Во-первых, из-за локального расположения и малых размеров дефектов требуется быстродействующая регистрирующая аппаратура, в то время как для плавных изменений толщины возможно усреднение сигналов. Кроме того, дефект на мгновение перекрывает канал коллиматора и сигнал от него на выходе детектора не является прямоугольным.

Во-вторых, в дефектоскопии размеры канала коллиматора определяются размером минимально выявляемых дефектов. Поэтому для обеспечения одинаковой чувствительности метода в дефектоскопии и толщинометрии в первом случае требуется больший поток излучения.

В-третьих, радиометрический дефектоскоп работает на основе постоянного сравнения дефектного и соседнего с ним бездефектного объемов объекта, сканируемых последовательно во времени, и поэтому требуются непрерывные измерения, в толщиномерах возможны дискретные измерения по сравнению с эталоном и получение результатов в абсолютных значениях. Эти различия приводят к тому, что чувствительность радиометрического метода в толщинометрии выше, чем в дефектоскопии.

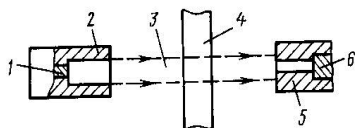


Рисунок 10.19 – Схема радиометрического контроля с использованием прошедшего излучения:

- 1 – источник излучения;
- 2 – радиационная защита источника излучения с коллиматором;
- 3 – рабочий пучок излучения;
- 4 – ОК;
- 5 – коллиматор детектора

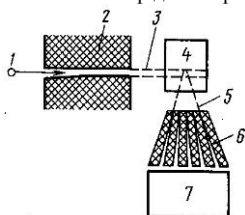


Рисунок 10.20 – Схема радиометрического контроля с использованием рассеянного излучения:

- 1 – источник излучения;
- 2 – коллиматор источника излучения;
- 3 – рабочий пучок излучения;
- 4 – ОК;
- 5 – пучок рассеянного излучения;
- 6 – коллиматор детектора;
- 7 – блок детектирования

Каждый из этих методов может реализоваться благодаря конструктивным и схемным решениям. Конструктивное решение обеспечивается изменением или введением в конструкцию радиометрического дефектоскопа нового узла. Схемные – обеспечиваются специальным построением электронной схемы регистрирующего тракта или введением дополнительных электронных блоков обработки сигнала. Как правило, используется сочетание конструктивных и схемных решений.

4 По форме представления информации различают *дискретный* (счетный) и *аналоговый* методы.

*Дискретный* метод заключается в счете числа импульсов на выходе детектора. Для этого импульсы с детектора сначала нормализуются с помощью формирователя, а затем поступают на пересчетное устройство. Время измерения, за которое регистрируется число импульсов, может регулироваться с помощью задания интервалов времени.

При *аналоговом* методе регистрации измеряется суммарный заряд детектора. Для этого импульсы детектора поступают на *RC*-цепочку – простейший интегратор тока. Чтобы уменьшить флуктуации напряжения на интегрирующей ячейке, обусловленные отклонением амплитуды импульсов тока, соответствующих различным зарегистрированным фотонам, вводят формирователь импульсов.

2 По *физическому принципу получения информации о контролируемом параметре (условие измерения)* объекта выделяют две группы методов: основанные на регистрации прошедшего через объект излучения (просвечивание) и основанные на регистрации рассеянного в объекте и вышедшего из него под различным углом излучения (рисунки 10.19, 10.20).

3 По *способу выделения полезной информации – сигнала*, вызванного недопустимыми изменениями в контролируемом объекте, различают методы подавления сопутствующего сигнала, устранение вклада рассеянного излучения, выделение полезного сигнала из шума.

Каждый из этих методов может реализоваться благодаря конструктивным и схемным решениям. Конструктивное решение обеспечивается изменением или введением в конструкцию радиометрического дефектоскопа нового узла. Схемные – обеспечиваются специальным построением электронной схемы регистрирующего тракта или введением дополнительных электронных блоков обработки сигнала. Как правило, используется сочетание конструктивных и схемных решений.

5 По виду использованного ионизирующего излучения различают рентгеновские, радиоизотопные и бетатронные (ускорительные) приборы и системы радиометрического контроля.

#### 10.4.3 Выбор источника излучения и область применения

Энергию излучения подбирают в зависимости от обеспечения требуемой чувствительности метода и отношения сигнала к шуму.

В общем случае при регистрации излучения радиационными измерительными приборами возможны погрешности трех типов: статистические, аппаратурные и аппаратурно-статистические.

*Статистическая* погрешность определяется флуктуациями потока или числом фотонов на входе в детектор и шумами при регистрации, которые невозможно отличить от сигнала.

*Аппаратурная погрешность* обусловлена в основном случайными изменениями параметров элементов, включенных в информационный тракт прибора (дрейф анодного напряжения и тока рентгеновской трубки, коэффициентов усиления усилителей и т. п.).

*Аппаратурно-статистическая* погрешность обусловлена наличием «мертвого времени» детектора, пересчетного устройства или счетчика, в течение которого эти элементы не регистрируют следующий импульс после поступления на них ионизирующей частицы, импульсов тока или напряжения.

При малой аппаратурной погрешности, по сравнению со статистической, энергию излучения выбирают из условия  $\mu_p \rho x = 2$ , где  $\mu_p$  – массовый коэффициент ослабления излучения,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;  $\rho$  – плотность материала,  $\text{г}/\text{см}^3$ ;  $x$  – толщина ОК, см (рисунки 10.21).

Когда мощность (активность) источника излучения достаточна и статистической погрешностью можно пренебречь по сравнению с аппаратурной, тогда энергию излучения выбирают из условия  $\mu_p \rho x = 1$ .

Практически энергия излучения соответствует данным таблицы 10.3 и ее значения уточняют с учетом сканирования, влияния рассеянного излучения.

Наиболее эффективная область применения радиометрического метода – автоматизированный контроль толстостенных объектов, для которых объем допустимого дефекта достаточно велик, но составляет незначительное количество в процентах от просвечиваемой толщины. Это обусловлено тем, что, во-первых, регистрируемый электрический сигнал пропорционален прошедшему через коллимационное окно потоку излучения; во-вторых, производительность контроля в сильной степени зависит от размеров выявляемого дефекта (неэффективно иметь размер площади окна коллиматора менее  $1 \text{ см}^2$ ) (таблица 10.3).

Радиометрический контроль эффективен для объектов, не имеющих локальных изменений толщины и плотности материала.

Наличие электрического сигнала, удобного для дальнейшей обработки, позволяет радиометрические системы эффективно использовать непосредственно в технологическом процессе создания готовой продукции. При этом сигналы, несущие информацию о дефектах, поступают через обратную связь для управления оборудованием производства, корректируя процесс (активный контроль). Система позволяет непосредственно вводить радиометрическую информацию в компьютер.

Таблица 10.3 – Область применения радиометрического метода

Толщина просвечиваемого сплава, мм			Источники излучения
железо	титан	алюминий	
0,02–1,00	0,05–3,00	1–20	Радиоактивные источники $\beta$ -излучения: $^{85}\text{Kr}$ , $^{90}\text{Zr}$ , $^{147}\text{Pm}$ , $^{204}\text{Tl}$
1–130	2–230	5–370	Рентгеновские аппараты с напряжением от 40 до 1000 кВ
1–150	2–330	5–500	Радиоактивные источники: $^{60}\text{Co}$ , $^{137}\text{Cs}$ , $^{192}\text{Ir}$ , $^{75}\text{Se}$ , $^{170}\text{Tm}$
$\geq 50$	$\geq 90$	$\geq 150$	Бетатроны с энергией ускоренных электронов от 6 до 35 МэВ

#### *Радиометрические системы дефектоскопии*

В целях обеспечения высокой чувствительности метода путем снижения вклада рассеянного излучения в полезный сигнал многие радиометрические системы работают с использованием многоканальных коллиматоров. При этом общие размеры коллиматора могут сократиться. Для повышения производительности контроля увеличивают число каналов регистрации с использованием блока приемников излучения, насчитывающих 9–10 детекторов. Для контроля толстостенных сложнопрофильных изделий также используют многоканальные (до 38 каналов) гамма-дефектоскопы.

#### **10.4.4 Расшифровка дефектов**

Радиометрический контроль позволяет определить две координаты дефекта, протяженность и его лучевой размер, не давая информации о характере дефекта. Дефектограммы на диаграммной ленте самописца (рисунок 10.21) описываются следующими параметрами: амплитудой, протяженностью, крутизной переднего и заднего фронтов импульса, конфигурацией вершины импульса.

Амплитуда сигнала свидетельствует о лучевом размере дефекта в случае перекрытия дефектом площади окна коллиматора. Обычно длину коллимационного отверстия в направлении сканирования выбирают равной 1,2–1,3 протяженности неоднородности объекта, подлежащего выявлению.

О глубине дефекта можно судить по записи эталона, устанавливаемого на поверхности объекта. Протяженность импульса на диаграмме говорит о размере в направлении сканирования, когда он больше или равен длине окна коллиматора. Если этот размер дефекта меньше длины окна, тогда он



определяется протяженностью переднего фронта импульса на диаграмме. Длину дефекта  $l_d$  определяют по формуле

$$l_d = l_{и} \frac{v_0}{v_1} - a, \quad (10.5)$$

где  $l_{и}$  – протяженность импульса по диаграммной ленте самописца;  $v_0, v_1$  – скорости сканирования и записи соответственно;  $a$  – размер окна коллиматора в направлении перемещения контролируемого объекта.

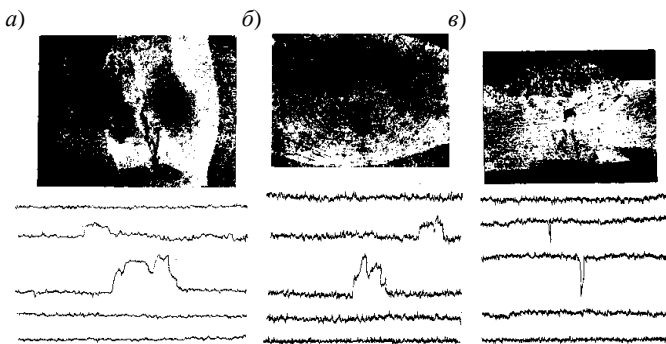


Рисунок 10.21 – Запись на диаграммной ленте дефектограммы шлифа сварного шва:  
*a* – толщина 50 мм; *б* – толщина 100 мм с трещиной;  
*в* – толщина 20 мм со шлаковыми включениями

По крутизне переднего и заднего фронтов импульса можно качественно судить о характере выявленного дефекта.

Так, дефектам округлой формы свойственен крутой фронт благодаря резкому вхождению такого дефекта в окно коллиматора, в то время как непровары и трещины характеризуются пологими фронтами вследствие постепенного и частичного заполнения ими площади окна коллиматора.

Форма вершины импульса свидетельствует о характере сечения дефекта по направлению оси просвечивания. Плавные по характеру изменения позволяют судить об изменениях лучевого размера дефекта. Резкие перепады говорят о наличии мелких изменений (дефектов) на фоне большого дефекта, расположенных на малом расстоянии друг от друга. Местоположение их проекций на плоскость окна коллиматора регистрирующая аппаратура радиометрической системы определить не позволяет.

## 10.5 Радиоскопия

### 10.5.1 Основы радиоскопического метода контроля

Радиоскопический метод контроля основан на просвечивании контролируемых объектов рентгеновским излучением, преобразовании ра-

диационного изображения объекта в светотеневое или электронное изображение и передаче этих изображений на расстояние с помощью оптики или телевизионной техники с одновременным анализом полученных изображений.

### **Системы радиоскопического контроля**

В производстве метод радиоскопии реализуется в виде системы контроля, состоящей из источника излучения, специализированного механического (электромеханического) манипулятора с дистанционным управлением и радиоскопической системы (радиационного интроскопа).

В качестве источников излучения при радиоскопическом методе контроля в основном применяются рентгеновские аппараты, за исключением импульсных и для панорамного просвечивания.

Манипулятор призван обеспечить:

- а) при контроле малогабаритных деталей или изделий:
  - механизированную подачу деталей или изделий к преобразователю излучения;
  - необходимые перемещения деталей или изделия относительно преобразователя излучения;
  - дистанционную маркировку дефектных участков деталей или изделия;
  - транспортировку проконтролированных деталей или изделий от преобразователя излучения;
- б) при контроле крупногабаритных деталей или изделий:
  - жесткое соосное крепление рентгеновской трубки и преобразователя излучения;
  - необходимое перемещение связанных между собой рентгеновской трубки и преобразователя излучения;
  - дистанционную маркировку дефектных участков деталей или изделия.

Радиоскопические системы представляют собой различные комбинации преобразователей радиационного изображения в оптическое, усилителей яркости и телевизионной техники. Они могут быть разбиты на два класса: 1 – с непосредственным анализом изображения на преобразователе; 2 – с дистанционной передачей изображения посредством замкнутой телевизионной системы (ЗТС), т. е. системы с кабельной связью между передающей и приемной трубками и анализом изображения на экране ВКУ (таблица 10.4).

*Таблица 10.4 – Характеристики телевизионных передающих трубок*

Тип трубки	Динамический диапазон	Разрешение, линий	Темновой ток, нА	Коэффициент передачи контраста
Видикон	300	900	20	0,65
Плюмбикон	300	700	3	0,95
Кремникон	100	700	10	1,0
Изокон	2000	1000	0	1,0

В системах **первой группы** основное усиление яркости изображения осуществляется в РЭОП, а затем изображение передается на малочувствительную передающую трубку типа *видикон*.

*Видикон* – это небольшая прочная трубка, на внутреннюю переднюю поверхность которой нанесены проводящий слой из прозрачного материала (сигнальный электрод) и слой чувствительного фотопроводящего материала (мишень).

Сканирующий мишень электронный пучок заряжает мишень до потенциала катода. Если световой поток воздействует на фотопроводящий материал, проводимость мишени увеличивается так, что при сканировании освещенных элементов мишени для зарядки до потенциала катода, на них будет осаждаться больше электронов пучка, вызывая появление электрического сигнала на сигнальном электроде.

В зависимости от типа фотопроводящего материала *видикон* имеет ряд модификаций. В стандартном *видиконе* используется 3-сернистая сурьма, в *плюмбиконе* – оксид свинца, в *кремниконе* – диодная (Si) матрица.

В системах **второй группы** световое изображение на экране-преобразователе сначала претерпевает небольшое усиление с помощью ЭО усилителя, а затем передается на высокочувствительную передающую трубку типа *изокон*.

Трубка типа *изокон* широко используется в ТВ-системах радиационных интроскопов. Световое изображение формирует на фотокатоде фотоэлектронное изображение, которое фокусируется с помощью осевого магнитного поля на тонкой изолированной мишени. Фотоэлектроны, взаимодействующие с мишенью, вызывают вторичную электронную эмиссию электронов, которые уходят на сетку, расположенную вблизи мишени, образуя на ней положительный заряд. Пучок из электронного прожектора трубки сканирует мишень, осаждая электроны на положительно заряженных участках мишени. При этом он частично отражается и одновременно рассеивается.

Рассеиваемая и отраженная части отраженного пучка разделяются ЭМП трубки и в ФЭУ, поступают только те электроны, которые несут информацию о световом изображении. Сигнал в рассеиваемой части пучка усиливается и становится выходным видеосигналом.

Возможна передача преобразованного изображения: 1) непосредственно на предающую телевизионную трубку; 2) через многокаскадный усилитель света.

Системы первого типа характеризуются:

- меньшими потерями света и информации в связи с отсутствием оптической системы для переноса изображения с преобразователя на катод усилителя;

- большей яркостью изображения, благодаря применению в телевизионных установках ЭОП.

Для систем второго типа характерны следующие особенности:

- получение большого по площади поля наблюдения;
- широкий диапазон контролируемых толщин и энергии излучения;
- отсутствие (по ходу излучения) толстого экрана из стекла, что способствует повышению эффективности регистрации излучения. Однако для того, чтобы снизить потери света при переносе изображения с экрана-преобразователя на усилитель света или высокочувствительную передающую трубку, требуется светосильная оптика.

В твердотельных ТВ-камерах в качестве чувствительных к свету элементов используются матрицы фотодиодов или ПЗС (обычно кремниевые). Эти матрицы могут быть однострочными или растровыми и состоять из отдельно адресуемых элементов. Такие матрицы имеют меньшие размеры и более широкую спектральную характеристику, меньшую инерционность и более высокий квантовый выход по сравнению с видиконными камерами.

В рентгеноТВ-установках оптическая связь между люминесцентными экранами или выходными экранами РЭОП осуществляется при помощи зеркал, линз и волоконной оптики.

### **10.5.2 Технология радиоскопического контроля**

Документами, разрешающими введение радиоскопического метода контроля, являются производственная инструкция по контролю и технологические карты радиоскопического контроля деталей и узлов, утверждаемые в установленном на предприятии порядке [85–87].

1 На подлежащие радиоскопическому контролю детали, неразъемные соединения и узлы разрабатываются технологические операционные карты с указанием в них: а) недопустимых дефектов; б) применяемого оборудования; в) режимов; г) схем просвечивания.

2 На этапе подготовки к контролю объекты необходимо тщательно рассмотреть и рассортировать по группам (определить оптимальную очередность контроля) с таким расчетом, чтобы проводить контроль с минимальным количеством изменений режимов.

3 Участки контролируемых соединений, деталей и узлов должны быть замаркированы, например, метками и цифрами из свинца.

4 В начале партии контролируемых деталей, а также в начале и в конце рабочей смены следует проверять чувствительность контроля по соответствующим эталонам.

5 Для контроля деталей, узлов и соединений радиоскопическим методом используют дистанционно управляемый манипулятор.

6 Качество контролируемого объекта контролируют непосредственно во время просвечивания. При разбраковке контролируемых объектов необходимо руководствоваться картами контроля или другой документацией, утвержденной в установленном порядке.

7 Регистрацию результатов контроля проводят путем фотографирования или видеосъемки изображения участков деталей, узлов и соединений.

Удельный вес радиационной дефектоскопии в машиностроении при контроле неразъемных соединений составляет более 80 %.

### **10.5.3 Область применения радиоскопических систем**

Область применения радиоскопических систем зависит от толщины, плотности контролируемого объекта и энергии излучения. Оптимальная энергия излучения с учетом чувствительности метода ориентировочно может быть определена из соотношения (без учета расстояния в объекте)  $\mu_{рх} = 2$ .

Экспериментальные зависимости относительной чувствительности (отношение протяженности минимально выявляемого дефекта в направлении просвечивания к просвечиваемой толщине) от энергии излучения имеют вид кривых с минимумом примерно при энергии, отвечающей соотношению  $\mu_{рх} = 2$ . Производительность радиоскопического контроля в основном определяется скоростью перемещения контролируемой детали, при которой чувствительность к дефектам (с учетом инерции зрения) ухудшается не более чем в 1,2–1,5 раза. Эта скорость для рентгенотелевизионных установок на основе сцинтилляционных монокристаллов составляет 1,0–1,5 мм/мин и для установок на основе видиконов – 0,3–0,5 мм/мин.

Назначение радиоскопического метода в основном то же, что и радиографии. Целесообразность контроля литых, сварных и паяных соединений этим методом определяется с учетом того, что по сравнению с радиографией чувствительность радиоскопического метода к дефектам примерно в два раза ниже. Этот метод позволяет просматривать внутреннюю структуру контролируемых объектов в процессе их перемещения относительно входного экрана со скоростью от 0,3 до 1,5 мм/мин в зависимости от типа преобразователя излучения. Производительность радиоскопического метода контроля в 3–5 раз выше производительности радиографического контроля.

При введении радиоскопического контроля базовым, контрольным методом является радиографический. В тех случаях, когда радиоскопический метод контроля по выявляемости дефектов удовлетворяет требованиям технических условий или чертежей на изготовление контролируемых деталей и узлов, он может быть введен вместо радиографического метода. Если радиоскопический метод контроля по выявляемости дефектов не удовлетворяет требованиям технических условий или чертежей на изготовление контролируемых деталей и узлов, он может быть использован в сочетании с радиографическим методом контроля и применяться для предварительной обработки деталей с дефектами, размеры которых лежат в пределах чувствительности радиоскопического метода контроля.

Достоинства методов радиационного контроля:

- высокая выявляемость макроскопических дефектов (трещин, непроваров, пор, раковин и других несплошностей) и объективность контроля;
- возможность определения характера, формы и размеров выявляемых дефектов и документирования получаемых результатов.

Методы радиационного контроля позволяют обнаружить дефекты в слитках и отливках, сварных, паяных, клепаных соединениях, сборочных единицах (неверная сборка, зазоры, перекосы, разрушение внутренних элементов, степень заполнения внутренних полостей, отклонения от заданных размеров) [83].

На железнодорожном транспорте методы радиационного контроля, как правило, применяются при контроле сварных швов железнодорожных цистерн.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Сформулировать сущность радиационного вида НК.
- 2 Дать классификацию методов радиационного контроля.
- 3 Описать механизмы возникновения тормозного и характеристического излучений.
- 4 Каковы физические основы радиографического метода контроля?
- 5 Привести схему радиографирования и пояснить назначение входящих в неё элементов.
- 6 Обосновать выбор источников излучения и рентгеновской пленки при радиографическом контроле.
- 7 Обосновать выбор оптимальной схемы контроля и фокусного расстояния, режимов просвечивания при радиографическом контроле.
- 8 Обосновать выбор времени экспозиции, оптимального напряжения, усиливающих экранов и схемы зарядки кассет при радиографическом контроле.
- 9 Перечислить основные операции радиографического контроля, их последовательность.
- 10 Как определяется чувствительность радиографического контроля?
- 11 Привести технологию обработки экспонированной рентгеновской пленки.
- 12 Как осуществляется расшифровка радиографических снимков?
- 13 Каковы физические основы радиометрического метода контроля.
- 14 Дать классификацию методов радиометрического контроля.
- 15 Как осуществляется выбор источника излучения и расшифровка дефектов при радиометрическом контроле?
- 16 Каковы физические основы радиоскопического метода контроля?
- 17 Описать технологию радиоскопического контроля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

**В** условиях длительной эксплуатации ПС подвергается различным внешним и внутренним воздействиям, в результате чего происходит деградация материала, коррозионные повреждения, возникают и развиваются трещины усталости на поверхностях деталей и другие виды дефектов. Несмотря на то, что проектирование деталей по современным кодам и технология изготовления и монтажа должны обеспечить реализацию назначенного ресурса, исключить возможность возникновения таких дефектов не удается.

Чтобы избежать серьезных последствий развития дефектов, проводят обследования с использованием методов НК. Современные методы и средства НК, используемые для оценки состояния деталей ПС, получили широкое развитие и распространение.

Актуальность данной темы объясняется тем, что в настоящее время значительное число объектов железнодорожной техники находится в эксплуатации и повреждение и разрушение их элементов может приводить к серьезным экономическим потерям и неблагоприятным воздействиям на окружающую среду. Существенно, что ПС имеет много деталей, сложных геометрических форм (узлы), доступ к которым может быть ограничен. В таких случаях методы и технические средства НК являются оптимальным и максимально удобным решением для проведения их обследования без выведения объекта из эксплуатации, а также обследования труднодоступных участков для выявления дефектов.

Дефектоскопия как средство выявления признаков деградации материала деталей ПС и предупреждения аварийных ситуаций, естественно, находится в поле внимания инженерного и научного сообщества. Постоянно развиваются методы определения размеров, ориентации дефектов, совершенствуется оборудование. Вопросам дефектоскопии материалов и конструкций уделяется всё большее внимание как у нас в стране, так и за рубежом, о чем свидетельствует возникновение учебных центров, задачей которых является подготовка и повышение квалификации специалистов для области разработки методов дефектоскопии и их применения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

---

1 ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Взамен ГОСТ 16504–74; введ. 01.01.1982. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 21 с.

2 ГОСТ 20911–89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 20911–75; введ. 01.01.1991. – М. : Стандартиформ, 2009. – 26 с.

3 ГОСТ 26656–85 Техническая диагностика. Контролепригодность. Общие требования. – Взамен ГОСТ 23563–79, ГОСТ 24029–80, РД 50–498–84; введ. 01.01.1987. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 19 с.

4 ГОСТ 24297–2013. Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля. – Взамен ГОСТ 24297–87; введ. 01.01.2014 – М. : Стандартиформ, 2014. – 11 с.

5 ГОСТ 15895–77 (СТ СЭВ 547–84). Статистические методы управления качеством продукции. Термины и определения. – Введ. 01.01.1977. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 46 с.

6 ГОСТ 18321–73 (СТ СЭВ 1934–79). Статистический контроль качества. Методы случайного отбора выборок штучной продукции. – Введ. 01.01.1974. – М. : Изд-во стандартов, 1973. – 8 с.

7 ГОСТ 18353–79. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Взамен ГОСТ 18353–73; введ. 01.07.1980. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.

8 ГОСТ Р 56542–2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 01.11.2020. – М. : Стандартиформ, 2019. – 10 с.

9 ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 15467–70, ГОСТ 16431–70, ГОСТ 17341–71, ГОСТ 17102–71; введ. 01.06.1979 – Минск : Госстандарт, 1979. – 26 с.

10 **Ефимов, В. В.** Средства и методы управления качеством : учеб. пособие / В. В. Ефимов. – М. : КНОРУС, 2016. – 232 с.

11 **Гурвич, А. К.** Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 1. Общие вопросы. Контроль проникающими веществами : практ. пособие / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов, С. Г. Сажин ; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1992. – 242 с.

12 ГОСТ 19200–80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов. – Взамен ГОСТ 19200–73; введ. 30.06.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 11 с.

13 ГОСТ 21014–88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – Взамен ГОСТ 20847–75, ГОСТ 21014–75; введ. 01.01.1990. – 60 с.

14 ГОСТ Р ИСО 6520–1–2012. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Ч. 1. Сварка плавлением. – Введ. 01.01.2014. – М. : Стандартиформ, 2014. – 36 с.

15 **Криворудченко, В. Ф.** Современные методы технической диагностики и неразрушающего контроля деталей и узлов подвижного состава железнодорожного транспорта: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / В. Ф. Криворудченко, Р. А. Ахмеджанов ; под ред. В. Ф. Криворудченко. – М. : Маршрут, 2005. – 436 с.



16 ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения. – Взамен ГОСТ 16504–74; введ. 01.01.1982. – М. : Стандартиформ, 2011 – 22 с.

17 ГОСТ 8.654–2016. Государственная система обеспечения единства измерений. Фотометрия. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 26148–84; введ. 01.07.2016. – М. : Стандартиформ, 2016 – 16 с.

18 Визуальный и измерительный контроль / В. В. Ключев [и др.]. – М. : РОНКТД, 1998. – 288 с.

19 **Туробов, Б. В.** Визуальный и измерительный контроль : учеб. пособие / Б. В. Туробов ; под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Спектр, 2014. – 222 с. (сер. Диагностика и безопасность).

20 Неразрушающий контроль : справ. в 8 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 1 : в 2 кн. Кн. 1. Визуальный и измерительный контроль; кн. 2. Радиационный контроль / Ф. Р. Соснин. – М. : Машиностроение, 2006. – 559 с.

21 СТБ ISO 9712–2016. Контроль неразрушающий. Квалификация и сертификация персонала в области неразрушающего контроля. – Взамен СТБ EN 473–2011; введ. 01.07.2017 – Минск : Госстандарт. – 2016. – 16 с.

22 ГОСТ 21105–87. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. – Взамен ГОСТ 21105–75; введ. 01.01.1988 – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.

23 Неразрушающий контроль : справ.: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Ключева. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М. : Машиностроение, 2008. – 864 с.

24 Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1983. – 350 с.

25 **Кретов, Е. Ф.** Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / Е. Ф. Кретов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : СВЕН, 2007 – 296 с.

26 **Марков, А. А.** Ультразвуковая дефектоскопия рельсов / А. А. Марков, Д. А. Шпагин. – СПб. : Образование и культура, 1999. – 218 с.

27 СТБ EN 583–6–13. Контроль неразрушающий – Ультразвуковой метод – Ч. 6: Дифракционно-временной метод обнаружения и измерения несплошностей. – Введ. 01.07.2014. – Минск : Госстандарт. – 2013. – 24 с.

28 СТБ ISO 10863–13. Неразрушающий контроль сварных соединений. Ультразвуковая дефектоскопия. Применение дифракционно временного метода контроля (TOFD). – Введ. 01.07.2014. – Минск : Госстандарт. – 2013. – 32 с.

29 СТБ EN 15617–13. Неразрушающий контроль сварных соединений. Дифракционно-временной метод (TOFD) – Границы допустимости. – Введ. 01.07.2014. – Минск : Госстандарт. – 2013. – 16 с.

30 РД 07.09–97. Руководство по комплексному УЗ-контролю колесных пар вагонов. – М. : Департ. вагонн. хоз.-ва РЖД, 1997. – 19 с.

31 **Воронков, И. В.** Преобразователи с фазированными решётками / И. В. Воронков, Л. В. Воронкова, В. Н. Данилов. – М. : Спектр, 2013. – 36 с.

32 **Данилов, В. Н.** Основы теории и некоторые аспекты применения преобразователей с фазированными решётками / В. Н. Данилов, Л. В. Воронкова. – М. : Спектр, 2015. – 154 с.

33 **Иванов, В. И.** Акустическая эмиссия : учеб. пособие / В. И. Иванов, Г. А. Бигус, И. Э. Власов ; под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Спектр, 2011. – 192 с. (сер. Диагностика безопасности).

34 Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 7 : в 2 кн. Кн. 1: Метод акустической эмиссии / В. И. Иванов, И. Э. Власов. – М. : Машиностроение, 2006. – 829 с.

35 ПБ 03–593–03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – М. : ПИО ОБТ, 2003. – 55 с.

36 ГОСТ Р 52727–2007. Техническая диагностика. Акустико-эмиссионная диагностика. Общие требования. – Введ. 30.09.2007. – М. : Стандартинформ, 2007. – 16 с.

37 Акустико-эмиссионный контроль котлов железнодорожных цистерн / В. В. Муравьев [и др.] // В мире НК. – 2004 (26). – № 4. – С. 69–72.

38 Акустико-эмиссионный контроль нефтеналивных и газовых цистерн / А. Н. Серьезнов [и др.] // Дефектоскопия. – 2001. – № 3. – С. 82–89.

39 Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов [и др.]; под ред. Л. Н. Степановой, А. Н. Серьезнова. – Новосибирск : Наука, 2011. – 271 с.

40 ГОСТ 24450–80. Контроль неразрушающий магнитный. Термины и определения. – Введ. 01.01.1982. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 8 с.

41 ГОСТ Р 56512–2015. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод. Типовые технологические процессы. – Введ. 01.06.2016. – М. : Стандартинформ, 2016. – 56 с.

42 РД 32.159–2000. Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. Руководящий документ. – М. : ЦВ ЦЛ МПС РФ, 2000. – 120 с.

43 РД 32.174–2001. Неразрушающий контроль деталей вагонов. Общие положения. Руководящий документ. – М. : ЦВ ЦЛ МПС РФ, 2001. – 56 с.

44 Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 4 : в 3 кн. Кн. 2 : Магнитопорошковый метод контроля / Г. С. Шелихов. – М. : Машиностроение, 2006. – 736 с.

45 **Шелихов, Г. С.** Магнитопорошковая дефектоскопия деталей и узлов. Практическое пособие / Г. С. Шелихов ; под ред. проф. В. Н. Лозовского. – М. : НТЦ «Эксперт», 1995. – 224 с.

46 **Шелихов, Г. С.** Магнитопорошковый контроль : учеб. пособие / Г. С. Шелихов, Ю. А. Глазков ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Спектр, 2014. – 182 с. (сер. Диагностика безопасности).

47 ГОСТ 28369–89. Контроль неразрушающий. Облучатели ультрафиолетовые. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 01.01.1991. – М. : Стандартинформ, 2006. – 7 с.

48 ЦТтех-36/5. Неразрушающий контроль деталей и узлов локомотивов и моторвагонного подвижного состава. Общие положения. Руководящий документ. – М. : Техинформ, 2006. – 16 с.

49 ГОСТ 21104–75. Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод. – Введ. 30.06.1976 – М. : Изд-во стандартов, 1975. – 6 с.

50 Феррозондовый метод неразрушающего контроля : пособие для дефектоскопистов. – Екатеринбург : Микроакустика, 2002. – 96 с

51 РД 32.149–2000. Феррозондовый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. Руководящий документ. – М. : ЦВ ЦЛ МПС РФ, 2000. – 160 с.

52 ГОСТ 25225–82. Контроль неразрушающий. Швы сварных соединений трубопроводов. Магнитографический метод. – Введ. 30.06.1983. – М. : Изд-во стандартов, 1982. – 14 с.

53 ГОСТ 24289–80. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения. – Взамен ГОСТ 23667–79; введ. 01.07.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 17 с.

54 Неразрушающий контроль: справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2 : в 2 кн. Кн 2 : Вихретоковый контроль / Ю. К. Федосенко [и др.]. – М. : Машиностроение, 2006. – 688 с.

55 **Федосенко, Ю. К.** Вихретоковый контроль : учеб. пособие / Ю. К. Федосенко, П. Н. Шкатов, А. Г. Ефимов ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Спектр, 2011. – 223 с. (сер. Диагностика безопасности).

56 ГОСТ 26697–85. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы магнитные и вихретоковые. Общие технические требования. – Введ. 01.01.1987. – М. : Изд-во стандартов, 1987. – 12 с.

57 ПР НК В. 1. Правила по неразрушающему контролю вагонов, их деталей и составных частей при ремонте. Общие положения. – М. : Дирекция совета по железнодорожному транспорту государств – участников содружества. – 2012. – 56 с.

58 РД 32.150–2000. Вихретоковый метод неразрушающего контроля деталей вагонов. Руководящий документ. – М. : МПС РФ, Депарг. вагонн. хоз.-ва РЖД. – 2002. – 97 с.

59 ГОСТ 18442–80. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования. – Взамен ГОСТ 18442–73; введ. 30.06.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 16 с.

60 СТБ 1172–99. Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Общие положения. – Взамен ГОСТ 18442–80; введ. 01.07. 2010. – Минск : Госстандарт, 2010. – 21 с.

61 **Прохоренко, П. П.** Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии (контроль проникающими веществами) / П. П. Прохоренко, Н. П. Мигун, И. В. Стойчева. – Минск : БНТУ, 2007. – 263 с.

62 Неразрушающий контроль: справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 4 : в 3 кн. Кн. 3 : Капиллярный контроль / М. В. Филинов. – М. : Машиностроение, 2006. – 736 с.

63 **Филинов, М. В.** Физические основы и средства капиллярной дефектоскопии / М. В. Филинов, П. П. Прохоренко. – М. : Физматлит, 2008. – 308 с.

64 ГОСТ 28369–89. Контроль неразрушающий. Облучатели ультрафиолетовые. Общие технические требования и методы испытаний. – Введ. 01.01.1991. – М. : Стандартиформ, 2006. – 9 с.

65 ГОСТ Р ИСО 3452–1–2011. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Ч. 1. Основные требования. – Введ. 13.12. 2011. – М. : Стандартиформ, 2012. – 19 с.

66 ГОСТ Р ИСО 3452–2–2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Ч. 2. Испытания пенетрантов. – Введ. 01.12.2010. – М. : Стандартиформ, 2011. – 32 с.

67 ГОСТ Р ИСО 3452–3–2009. Контроль неразрушающий. Проникающий контроль. Ч. 3. Испытательные образцы. – Введ. 01.12.2010. – М. : Стандартиформ, 2011. – 12 с.

68 Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2 : в 2 кн. Кн. 1: Контроль герметичности / А. И. Евлампиев [и др.]. – М. : Машиностроение, 2006. – 688 с.

69 Течейскание : учеб. пособие / А. И. Евлампиев [и др.] ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Спектр, 2011. – 208 с. (сер. Диагностика безопасности).

70 ГОСТ 24054–80. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования. – Введ. 01.01.1981. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 9 с.

71 СДОС–07–2012. Методические рекомендации о порядке проведения контроля герметичности технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Сер. 32. Вып. 8. – М. : НТЦ по безопасности в промышленности, 2012. – 87 с.

72 Современные методы течеискания // Успехи физических наук [Электронный ресурс]. – 2003. – № 2. – Режим доступа : <http://www/ufn/ru/>. – Дата доступа : 10.09.2019.

73 ГОСТ 26790–85. Техника течеискания. Термины и определения. – Введ. 01.01.1987. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 8 с.

74 ГОСТ 28517–90. Контроль неразрушающий. Масс-спектрометрический метод течеискания. – Введ. 30.06.1991. – М. : Стандартинформ, 2005. – 7 с.

75 ГОСТ 26182–84. Контроль неразрушающий. Люминесцентный метод течеискания. – Введ. 01.01.1986. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 3 с.

76 **Рисс, Н.** Мобильные методы контроля герметичности / Н. Рисс, А. Ф. Иванков, Т. В. Сингаевская // В мире НК. – 2009. – № 2 (44). – С. 11–13.

77 Течеискатель пузырьковый. Прайс-лист фирмы ООО «Феррологика» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www/techecontrol/ru/>. – Дата доступа : 10.09.2019.

78 Неразрушающий контроль : справ. : в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 5 : кн. 1. Тепловой контроль / В. П. Вавилов; кн. 2. Электрический контроль / К. В. Подмастерьев [и др.] – М. : Машиностроение, 2006. – 687 с.

79 ГОСТ 23483–79. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. – Введ. 01.01.1980. – М. : Изд-во стандартов, 1980. – 14 с.

80 ГОСТ Р 53698–2009. Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения. – Введ. 01.01.2011. – М. : Стандартинформ, 2010. – 12 с.

81 РД–13–04–2006. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. – Сер. 28. Вып. 11. – 2-е изд., испр. – М. : НТЦ исследований проблем промышленной безопасности, 2010. – 32 с.

82 ГОСТ Р 55776–2013. Контроль неразрушающий радиационный. Термины и определения. – Введ. 22.11.2013. – М. : Стандартинформ, 2015. – 12 с.

83 ГОСТ 20426–82. Контроль неразрушающий. Методы дефектоскопии радиационные. Область применения. – Взамен ГОСТ 20426–75; введ. 30.06.1983. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1982. – 25 с.

84 **Артемьев, Б. В.** Радиационный контроль : учеб. пособие для вузов / Б. В. Артемьев, А. А. Буклей ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Спектр, 2013. – 191 с. (сер. Диагностика безопасности).

85 ГОСТ 7512–82. Контроль неразрушающий. Соединения сварные радиографический метод. – Введ. 01.01.1984. – М. : Стандартинформ, 2008. – 19 с.

86 СДОС–01–2008. Методические рекомендации о порядке проведения радиационного контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах. – Сер. 32. Вып. 2. – М. : Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности, 2008. – 104 с.

87 ГОСТ 15843–79. Принадлежности для промышленной радиографии. Основные размеры. – Взамен ГОСТ 15843–70; введ. 30.06.1980. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 1979. – 6 с.

Учебное издание

*ХОЛОДИЛОВ Олег Викторович*

**Дефектоскопия подвижного состава  
железнодорожного транспорта**

Учебное пособие

Редактор *А. А. Павлюченкова*

Технический редактор *В. Н. Кучерова*

Подписано в печать 28.10.2020 г. Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.  
Усл. печ. л. 19,07. Уч.-изд. л. 19,56. Тираж 100 экз.  
Зак. № 3076 . Изд. № 42.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский государственный университет транспорта.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/361 от 13.06.2014.  
№ 2/104 от 01.04.2014.  
№ 3/1583 от 14.11.2017.  
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель