

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»  
(Самарский университет)

*Д.Ю. КИСЕЛЕВ, И.М. МАКАРОВСКИЙ*

## НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, 25.04.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей

САМАРА  
Издательство Самарского университета  
2017

УДК 621.4(075+620.19075)

ББК 68.53я7

К 44

Рецензенты: зам. руководителя Приволжского межрегионального территориального управления воздушного транспорта Федерального агентства воздушного транспорта А. М. Н е т р е б а;  
канд. техн. наук, доц. Самарского университета А. В. С у с л и н

***Киселев, Денис Юрьевич***

К 44 **Неразрушающие методы контроля технического состояния воздушных судов:** учеб. пособие / *Д.Ю. Киселев, И.М. Макаровский.* – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 127 с.

**ISBN 978-5-7883-1177-7**

Рассмотрены основы 6 методов неразрушающего контроля: визуально-оптического, капиллярного, магнитопорошкового, токовихревого, ультразвукового и рентгенографического. Показана физическая сущность методов. Описано используемое оборудование при проведении данных видов контроля, методика их настройки. Даны практические рекомендации по проведению контроля образцов авиационной техники.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей, 25.04.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей.

УДК 621.4(075+620.19075)

ББК 68.53я7

ISBN 978-5-7883-1177-7

© Самарский университет, 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	5
2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	6
3. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ ПРОДУКЦИИ.....	13
3.1. Классификация дефектов.....	13
3.2. Дефекты в неметаллических деталях.....	17
4. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ.....	19
4.1. Общие сведения.....	19
4.2. Физические основы ВОК.....	20
4.3. Методы контроля ВОК.....	24
4.4. Технология контроля ВОК.....	32
5. КАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	38
5.1. Общие сведения.....	38
5.2. Физические основы КНК.....	39
5.3. Материалы, используемые при проведении КН.....	44
5.4. Технология контроля КНК.....	44

6. МАГНИТНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ.....	54
6.1. Общие сведения.....	54
6.2. Физические основы МНК.....	54
7. ТОКОВИХРЕВОЙ КОНТРОЛЬ.....	70
7.1. Общие сведения.....	70
7.2. Физические основы ТВК.....	71
7.3. Технология проведения ТВК.....	84
8. АКУСТИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ.....	91
8.1. Общие сведения об акустической дефектоскопии.....	91
8.2. Физические основы акустической дефектоскопии.....	92
8.3. Ультразвуковая дефектоскопия.....	94
9. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ.....	116
9.1. Общие сведения.....	116
9.2. Физические основы РК.....	117
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	126

# 1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О МЕТОДАХ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Методы неразрушающего контроля (дефектоскопия) – обобщающее название методов контроля объектов, используемых для обнаружения внутренних или внешних дефектов в объектах контроля, отклонений их химического состава и для иных целей.

Уже в самом названии «методы неразрушающего контроля» подразумевается то, что эти методы не требуют разрушения объекта в целом.

Рассмотрим основные требования, предъявляемые к неразрушающим методам (НК) контроля (дефектоскопии):

- возможность контроля качества продукции на всех стадиях жизненного цикла (изготовление, эксплуатация, ремонт) по большинству заданных параметров;
- высокая достоверность результатов контроля;
- высокая надежность и точность аппаратуры для проведения контроля, а также возможность использования ее в различных условиях (снег, дождь, повышенная влажность и т. д.);
- простота методик выполнения контроля, а также техническая доступность средств контроля в условиях производства, эксплуатации и ремонта;
- возможность автоматизации и механизации контроля технологических процессов, а также управления ими с использованием сигналов, выдаваемых средствами контроля;
- согласованность времени, которое затрачивается на контроль, со временем работы другого технологического оборудования.

Основными областями применения неразрушающих методов контроля являются:

- проведение исследований структуры материалов и дефектов в изделиях с целью совершенствования технологии;
- непрерывная дефектоскопия особо ответственных объектов;
- дефектоскопия объектов длительной эксплуатации.

Применение методов НК на различных этапах эксплуатации АТ способствует:

- повышению достоверности определения технического состояния высоконагруженных объектов;
- уменьшению интенсивности отказов, а следовательно, и предотвращению летных происшествий, катастроф;

- экономии материальных ценностей, уменьшению времени простоя АТ, сокращению ремонтных работ из-за возникновения дефектов;

- полной выработке межремонтных и назначенных ресурсов АТ и их обоснованному увеличению при сохранении заложенного уровня надежности.

## **2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Эффективность определяется большим числом факторов, главными из которых являются выявляемость дефектов, стоимость, оперативность, производительность и безопасность.

Каждый метод НК ориентирован на выявление определенных дефектов. Например, дефекты только на поверхности объектов позволяют обнаруживать визуальные и капиллярные методы контроля; поверхностные и подповерхностные дефекты обнаруживаются при помощи магнитного и токовихревого методов. Акустическим и радиационным методами можно обнаружить поверхностные, подповерхностные и внутренние дефекты.

В таблице приведены краткие сведения о достоинствах и недостатках, а также возможностях основных методов НК, связанные с обнаружением несплошности металлов (в таблице приведены не принципиальные возможности методов, а только лишь те из них, которые могут быть реализованы с помощью серийной аппаратуры).

Наиболее благоприятными, с точки зрения автоматизации контроля, являются следующие методы: магнитный (с феррозондовыми, индукционными и подобными типами преобразователей), токовихревой, радиационный и некоторые виды тепловых. Главные преимущества перечисленных методов – это отсутствие прямого контакта преобразователя с объектом контроля и предоставление информации о дефектах в виде показаний приборов дефектоскопов. Ультразвуковой метод с этой точки зрения требует контакта преобразователя с контролируемым объектом, например, через слой воды. Трудность автоматизации других методов контроля заключается в необходимости визуальной обработки информации о дефектах.

С точки зрения опасности для персонала, проводящего контроль, выделяются радиационные методы. Методы капиллярного контроля и течеискания при использовании определенных типов пробных веществ и ультрафиолетовых осветителей также обладают определенной токсичностью.

**Таблица. Возможности применения методов НК**

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Капиллярный	Металлические изделия, полуфабрикаты и сварные соединения	Поверхностные открытые трещины, поры, коррозионные поражения	Раскрытие дефекта: $\geq 1$ мкм, протяженность: $\geq 3-5$ мм	Чистота обработки поверхности Rz20	Простота и наглядность контроля. Возможность контроля объектов различной формы	Необходимость удаления с поверхности защитных покрытий, смазок, окислов и других загрязнений
		Поверхностные и подповерхностные (на глубине до 2-3 мм) трещины, волосовины, заковы, закаты, включения, флокены, непровары	Раскрытие дефекта $\geq 2$ мм, глубина $\geq 20$ мкм, Протяженность $\geq 0,5$ мм	Ферромагнитные металлы, чистота обработки поверхности Rz2,5	Простота и наглядность контроля. Возможность применения метода для изделий любой формы	Загрязнение поверхности. Необходимость размагничивания изделия после контроля. Возможность образования прижогов на поверхности
Магнитный						

Продолжение табл.

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Токовихревой	Металлические изделия и полуфабрикаты	Внутренние трещины, раковины,	Ширина дефекта $\geq 0,5$ мкм, глубина $\geq 100-200$ мкм, протяженность $\geq 0,5-1$ мм	Чистота обработки поверхности Rz2,5	Бесконтактное возбуждение вихревых токов. Возможность автоматизации при больших скоростях контроля с записью результатов. Возможность контроля внутренних поверхностей. Возможность контроля через немагнитические покрытия	Трудность выделения полезного сигнала на фоне помех, обусловленных его зависимостью от многих параметров контролируемого изделия. Отсутствие наглядности результатов контроля



Продолжение табл.

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
	Слитки и фасонные отливки	неметаллические включения, флокеноподобные дефекты	Эквивалентная площадь дефекта $\geq 5 \text{ мм}^2$	Простая форма, мелкозернистая структура, обработка поверхности Rz10	Выявление дефектов с малым раскрытием, характерных для деформированного металла	Необходимость создания акустического контакта через жидкую среду и ограничения по чистоте обработки поверхности
Акустический	Поковки, штамповки, сортовой прокат толщиной $\geq 10 \text{ мм}$	Внутренние трещины, расслоения, флокены, неметаллические включения, а также (при малых толщинах и для сплошных цилиндров малого диаметра) поверхностные заковы, закаты, включения	Эквивалентная площадь дефекта $\geq 3 \text{ мм}^2$ (в отдельных случаях $\geq 0,5 \text{ мм}^2$ )	Простая форма, обработка поверхности Rz10	Возможность контроля больших толщин (до 2–5 м в зависимости от структуры металла)	Малая чувствительность при контроле крупнозернистых материалов, например, литых изделий и сварных соединений из аустенитных сталей

Продолжение табл.

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Акустический	Листовой прокат толщиной $\geq 0,5$ мм	Внутренние расслоения и другие дефекты, ориентированные в плоскости прокатки	Эквивалентная площадь дефекта $\geq 1 \text{ мм}^2$ или условная площадь $\geq 5 \text{ см}^2$	Очистка поверхности от грязи, отслаивающейся окислы	Возможность автоматизации (при простой геометрической форме изделия)	Отсутствие наглядности и сложность расшифровки результатов контроля, оценка размеров и дефектов с большими погрешностями
	Трубы диаметром $\geq 4$ мм и толщиной $\geq 1$ мм	Внутренние поверхностные трещины, риски, закаты, включения	Эквивалентная глубина дефекта $\geq 3$ % от толщины стенки трубы			

Продолжение табл.

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Акустический	Сварные соединения стыковые, тавровые, угловые, крестообразные толщиной $\geq 6$ мм	Внутренние трещины, непровары, газовые поры, включения, несплавления, утяжки	Эквивалентная площадь дефекта $\geq 3$ мм <sup>2</sup>	Простая форма, мелкозернистая структура, обработка поверхности Rz10		
Радиографический	Сварные и резьбовые соединения	Непровары, трещины, поры, шлаковые включения, непровар	Локальные дефекты размером $\geq 1,5-2$ % от контролируемой толщины	Двусторонний доступ, отсутствие загрязнений	Высокая чувствительность контроля. Наглядность результатов контроля. Наличие документа о результатах контроля	Радиационная опасность. Большая длительность технологического цикла контроля. Расход дорогостоящей радиографической пленки

Окончание табл.

Метод	Объекты контроля	Типы обнаруживаемых дефектов	Минимальные размеры обнаруживаемых дефектов	Требования к объекту контроля	Достоинства	Недостатки
Радиографический	Литые изделия	Трещины, раковины, рыхлоты, пористость	Локальные дефекты размером $\geq 2-4$ % от контролируемой толщины			
Течеискание	Конструкции и изделия энергетических узлов	Сквозные дефекты в сварных соединениях и основном металле	Дефекты, дающие натекание $> 6,7 \cdot 10^{-11}$ м <sup>3</sup> .Па/с	Изделия, которые могут быть помещены в вакуумную камеру или воду; замкнутые и разомкнутые корпусные конструкции	Большой арсенал способов контроля различных классов изделий	Необходимость осушки изделия нагревом до 150–400 °С или применения различных индикаторных составов

Остальные методы НК не оказывают заметного влияния на здоровье обслуживающего персонала (дефектоскопистов).

Экономическая составляющая стоимости проведения методов НК зависит от определенного метода, среди которых наиболее дорогие: радиографический и течеискания. Высокая стоимость проведения данных методов связана с длительностью операций контроля, а также с необходимостью капитальных затрат на оборудование и специального помещения.

В определенных случаях необходимо контролировать объект двумя или несколькими методами (обычно сочетают методы, способные обнаруживать внутренние и поверхностные дефекты – акустический и магнитный контроль; магнитопорошковый метод контроля, акустический и токовихревой контроль, или плоские и объемные дефекты – ультразвуковой контроль и радиография).

Дополнительный контроль также осуществляется только в тех случаях, когда основной метод не обеспечивает заданных требований, или назначается для повышения информативности об объекте контроля.

Например, при токовихревом контроле узла стабилизатора ЛА после выявления дефектоскопистом дефекта проводится дополнительный контроль (обычно капиллярный) для подтверждения выявленного дефекта.

Для контроля внутренних поверхностей используются акустический и визуально-оптический методы контроля (или токовихревой и визуально-оптический метод).

### **3. ВИДЫ ДЕФЕКТОВ ПРОДУКЦИИ**

#### **3.1. Классификация дефектов**

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативной документацией (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.д.).

Дефектами являются любые отклонения параметров материалов, деталей и изделий от заданных (например, цепочка размеров, качество обработки поверхности, а также ряд других физических величин).

К несоответствиям относятся неоднородность состава материала: наличие включений, изменение химического состава, наличие других фаз материала, отличных от основной фазы, и др.; нарушение сплошности материалов и деталей.

Далее рассмотрим, по каким признакам можно классифицировать дефекты.

Дефекты подразделяются на явные (выявляются глазами) и скрытые (внутренние, подповерхностные, т. е. не различимые глазом).

В зависимости от возможного влияния дефекта на служебные свойства детали дефекты могут быть:

- малозначительными (на работоспособность продукции никак не оказывают влияния);
- значительными (существенно влияют на использование продукции и/или на ее долговечность, но не являются критическими);
- критическими (при их наличии использование продукции по назначению невозможно или исключается по соображениям безопасности и надежности).

По происхождению дефекты изделий бывают:

- производственно-технологические (возникающие при изготовлении, сварке, резке, пайке, клепке, склеивании, механической или химической обработке и т. п.);
- эксплуатационные или ремонтные (возникают после некоторой наработки изделия в результате усталости материала, изнашивания трущихся узлов, а также неправильной эксплуатации, технического обслуживания и ремонта);
- конструктивные (несовершенство конструкции из-за ошибок на этапе проектирования).

Также для выбора оптимальных методов и параметров контроля производится классификация дефектов по различным признакам: по размерам дефектов, их количеству и форме, месту расположения дефектов в контролируемом объекте и т. д.

В ультразвуковой дефектоскопии размер дефекта (дефектов) влияет на выбор рабочей частоты. Размеры дефектов могут изменяться от долей миллиметров до сколь угодно большой величины.

Количественная классификация дефектов подразумевает три случая:

- одиночные дефекты (рис. 1, *а*);
- групповые (множественные) дефекты (рис. 1, *б*);
- сплошные дефекты (рис. 1, *в*).

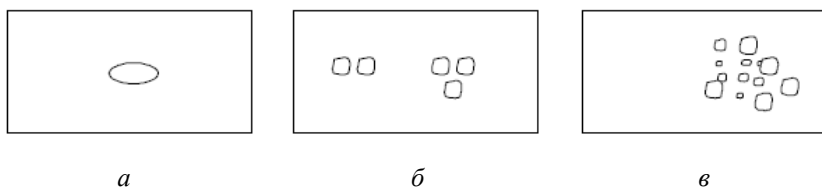


Рис. 1. Количественная классификация дефектов:  
*а* – одиночные; *б* – групповые; *в* – сплошные

Для классификации дефектов по форме существуют три основных случая:

- дефекты правильной формы – овальные, очень близкие к сферической или цилиндрической форме, без каких-либо острых краев (рис. 2, *а*);
- дефекты чечевицеобразной формы, с острыми краями (рис. 2, *б*);
- дефекты произвольной, неопределенной формы с острыми краями:  
 трещины, посторонние включения (рис. 2, *в*).

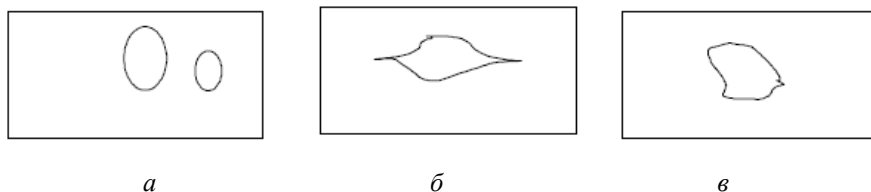


Рис. 2. Классификация дефектов по форме:  
*а* – правильная форма; *б* – чечевицеобразная форма с острыми краями;  
*в* – произвольная, неопределенная форма с острыми краями

Дефекты правильной формы, без острых краев, наименее опасны, потому что вокруг них не происходит концентрации напряжений.

Дефекты с острыми краями (рис. 2, *б*, *в*) являются концентраторами напряжений. Они увеличиваются в процессе эксплуатации изделия по линиям концентрации механических напряжений, что, в свою очередь, приводит к разрушению изделия.

Из вышесказанного следует, что форма дефекта определяет его опасность с точки зрения разрушения конструкции.

Классификация дефектов по положению:

- поверхностные дефекты, расположенные на поверхности материала, полуфабриката или изделия – трещины, вмятины, посторонние включения (рис. 3, *а*);

- подповерхностные дефекты – дефекты, расположенные под поверхностью контролируемого изделия, но вблизи самой поверхности (рис. 3, *б*);

- объемные дефекты – дефекты, расположенные внутри изделия (рис. 3, *в*).

Наличие фосфовидных и нитридных включений и прослоек может привести к образованию дефектов еще одного вида – сквозных.

По форме поперечного сечения сквозные дефекты бывают круглые (поры, свищи, шлаковые включения) и щелевидные (трещины, непровары, дефекты структуры, несплошности в местах расположения оксидных и других включений и прослоек).

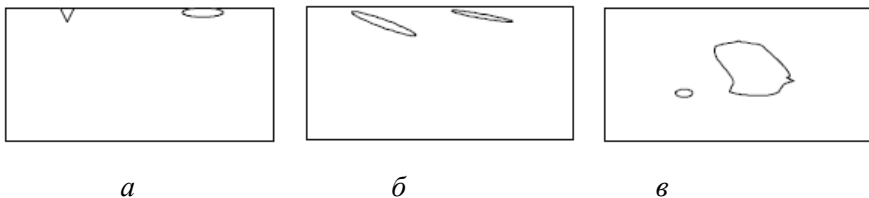


Рис. 3. Классификация дефектов по положению контролируемом объекте:  
*а* – поверхностные; *б* – подповерхностные; *в* – объемные

Сквозные дефекты по характеру внутренней поверхности подразделяются на гладкие (внутренняя поверхность шлаковых каналов) и шероховатые (внутренняя поверхность трещин, непроваров и вторичных поровых каналов).

Положение дефекта влияет как на выбор метода контроля, так и на его параметры. При ультразвуковом контроле положение дефекта влияет на выбор типа волн – поверхностные дефекты лучше всего определяются рэлеевскими волнами, подповерхностные – головными волнами, а объемные – объемными (продольными) волнами.



Опасность влияния дефектов на работоспособность зависит от их вида, типа и количества. Классификация возможных дефектов в изделии позволяет правильно выбрать метод и средства контроля.

### 3.2. Дефекты в неметаллических деталях

К дефектам изделий из любых материалов относятся отклонения размеров и геометрических форм основных и свободных поверхностей (несоосность, непрямолинейность, непараллельность, перпендикулярность, шероховатость, эксцентричность), изменение толщины покрытия, влажность.

Далее отдельно перечислим дефекты для некоторых неметаллических материалов.

Возникновение дефектов в *полимерных композиционных материалах* во многом определяется вязкостью связующего, степенью пропитки армирующего материала, температурой технологического оборудования, температурой входящего армирующего материала, скоростью протягивания арматуры, ее напряжением, давлением обжатия армирующего материала, сушкой армирующего материала, липкостью, содержанием летучих и растворимых веществ, плотностью полуфабриката, скоплением связующего армирующего наполнителя и способом его укладки.

Наиболее характерными дефектами для методов открытого формирования являются пористость, расслоения, участки неполного отверждения, изменение толщины, низкое значение физико-механических свойств, неравномерное распределение связующего наполнителя, складки. Для закрытого формирования характерными дефектами являются трещины, расслоения, локальная пористость, неравномерное распределение связующего наполнителя и участки его локальной ориентации, нарушения ориентации наполнителя, внутренние остаточные напряжения, обрывы нитей и волокон.

Основные дефекты *стекла* – нарушения физической однородности и сплошности. Они могут быть структурными, технологическими, эксплуатационными.

Это могут быть разрывы, субмикротрещины и микротрещины, технологические пузыри размерами от 0,8 до 3 мм (рис. 4), неровности поверхности.



Рис. 4. Технологические пузыри на стекле (увеличенное изображение)

При эксплуатации возможны физико-механические повреждения, коррозия, помутнения, точечные каверны, микротрещины, царапины (рис. 5), сколы.



Рис.5. Царапины на стекле

Дефекты *керамики* возникают из-за нарушения технологии изготовления изделий из керамической массы.

Различают дефекты, связанные с искажением размеров и формы изделия (коробление, деформации); с изменением структуры материала (трещины, прыщи, посечки и свищи); дефекты поверхности (пузыри, мушки, выплавки, вскипы, наколы, металлический блеск).

Трещины возникают из-за недостаточной обработки керамической массы, неодинаковой плотности различных мест полуфабриката, резкого изменения температуры во время наибольшей усадки или в процессе охлаждения, неправильной укладки изделий и т. п.

Дефектами *полупроводниковых материалов* являются изменение параметров зонной структуры и основных параметров примесных центров, нарушения кристаллической структуры, изменение чистоты материала, наличие электрически активных и неактивных примесей, неоднородность распределения примесей по объему материала и устройства, механические напряжения.

## **4. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ**

### **4.1. Общие сведения**

Данный вид контроля основан на использовании законов геометрической оптики – законов распространения, преломления и отражения лучей света в системах оптических приборов.

Это наиболее простой в освоении метод.

Визуально-оптический контроль (ВОК) в основном применяется:

- для обнаружения трещин, мест разрушений элементов конструкций, трещин, загрязнений, течей, посторонних предметов внутри закрытых конструкций;
- для детального анализа поверхностных дефектов, которые обнаружены на контролируемых объектах с помощью какого-либо метода неразрушающего контроля;
- для фрактографирования изломов.

Этому виду контроля характерны сравнительно высокая трудоемкость выполнения смотровых работ.

## 4.2. Физические основы ВОК

ВОК в основном выполняют вручную, и результаты контроля во многом зависят от субъективных факторов, прежде всего от остроты зрения дефектоскописта.

Основные преломляющие элементы глаза человека – хрусталик и роговица, которые представлены на рис. 6. Оптическая (преломляющая) сила роговицы почти всегда постоянна и составляет примерно 43 диоптрии.

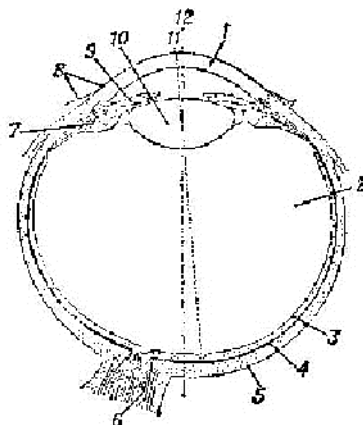
Подробнее рассмотрим строение человеческого глаза.

Хрусталик глаза – двояковыпуклая линза. Кривизна хрусталика может трансформироваться, изменяя при этом его оптическую силу от 19 до 33 дп – это так называемая аккомодация глаза, или наводка на резкость.

Между хрусталиком и роговицей находится радужная оболочка глаза с отверстием переменного диаметра – зрачком, который исполняет функции диафрагмы. При дневных освещенностях диаметр зрачка глаза составляет приблизительно 2–3 мм, а при освещенности менее 0,01 лк увеличивается до 6–8 мм.

Рис. 6. Схематическое изображение человеческого глаза:

- 1 – роговая оболочка;
- 2 – стекловидное тело; 3 – сетчатая оболочка; 4 – сосудистая оболочка;
- 5 – склера; 6 – зрительный нерв;
- 7 – цилиарное тело; 8 – конъюнктива;
- 9 – радужная оболочка;
- 10 – хрусталик; 11 – ось видения;
- 12 – оптическая ось глаза



В сетчатке, на которую проецируется изображение, расположены светочувствительные клетки – палочки и колбочки. Палочки более светочувствительны, чем колбочки, но они не различают цветов. Палочки могут различать белую поверхность от черной при освещенности  $10^{-6}$  лк. Различающие цвет колбочки менее светочувствительны и не работают при освещенности ниже  $10^{-2}$  лк. Практически цветное зрение начинается при освещенности около 1 лк, а при освещенности  $10^2 - 10^3$  лк зрение является почти полностью колбочковым.

Колбочки и палочки расположены в сетчатке неравномерно. Вокруг центральной ямки находится желтое пятно - овальный участок с угловыми размерами 6–7°. Здесь имеются и палочки, и колбочки. При удалении от центральной ямки общее число колбочек относительно снижается, а число палочек, наоборот, повышается. Вместе с этим убывает разрешающая чувствительность.

Поле зрения человеческого глаза условно разделяют на 3 части:

- зона наиболее четкого видения (это центральная зона с полем зрения приблизительно 2°);

- зона ясного видения (в пределах этой зоны (при неподвижном глазе) возможно опознавание предметов без различения мелких деталей, с полем зрения приблизительно 20° по вертикали и 30° по горизонтали);

- зона периферического зрения (в ее пределах предметы не опознаются. Поле зрения составляет примерно 125° по вертикали и 150° по горизонтали).

Объект, подвергающийся контролю, должен быть размещен в центральной зоне или в зоне ясного видения.

Под видимостью понимают степень различимости объектов при их наблюдении.

Видимость предмета определяется объективными свойствами, такими как:

- контрастом;
- яркостью;
- угловыми размерами;
- резкостью контуров.

Каждому из приведенных выше свойств соответствует свой абсолютный порог видимости, ниже которого предмет не может быть виден, какими бы благоприятными и были условия наблюдения с точки зрения других факторов (при слишком малом контрасте или очень малой яркости предмет нельзя сделать видимым никакой продолжительностью рассматривания или увеличением угловых размеров).

Наиболее важными условиями видимости считают контраст и угловые размеры.

Контраст – свойство объекта выделяться на окружающем фоне с помощью различия оптических свойств. Различают одновременный (объясняется различием излучения нескольких одновременно

видимых объектов, которые кажутся человеку, проводящему контроль, находящимися в непосредственном соприкосновении) и последовательный (изменение визуальной оценки объекта от того, какой свет раньше действовал на тот же участок сетчатки глаза) контрасты.

Порог контрастной чувствительности – минимальный различимый человеческим глазом яркостный контраст фона и предмета. Для большинства людей он равен 1–2 %. Некоторые дефекты, у которых контраст меньше порогового значения (практический порог контрастной чувствительности дефектов составляет от 5 % и более), не могут быть обнаружены глазом.

Мерой яркостного контраста принимается выражение:

$$K = (B_{\phi} - B_0) / B_{\phi},$$

где  $B_{\phi}$  – яркость окружающего фона;  $B_0$  – яркость рассматриваемого объекта.

В случае достаточной освещенности и при большом контрасте глаз может различать только те элементы предмета, у которых угловой размер выше некоторого определенного значения. Данное значение называется остротой зрения и для нормального глаза в оптимальных условиях доходит до 1' единицы, а среднее значение составляет 2–4' единиц.

Наибольшая величина яркостного контраста достигается при использовании черного и белого цветов. Высокий яркостный контраст имеет сочетание черного цвета с желтым фоном, а среди других хроматических цветов белый цвет образует наибольший контраст с красным фоном.

На остроту зрения и разрешающую способность оказывает влияние иррадиация. Она заключается в кажущемся увеличении размеров световых предметов на темном фоне (чем светлее предмет, тем он кажется больше).

Цвет объектов и фона также влияет на остроту зрения.

Цвета, в свою очередь, подразделяются на ахроматические (белый, черный, серый) и хроматические (остальные цвета).

Ахроматический интервал – отношение значения цветового порога к соответствующему значению светового порога.

Угловой размер оказывает влияние на воспринимаемый цвет малых объектов. При уменьшении углового размера от  $1,5^{\circ}$  до  $6^{\circ}$

цвет красных объектов остается неизменным, зеленые, синие и сине-зеленые становятся менее насыщенными. При дальнейшем уменьшении углового размера цвет объектов теряет насыщенность, и они становятся серыми (кроме красных).

Разрешающая способность человеческого глаза – способность раздельно воспринимать близкорасположенные друг к другу точки, линии и другие фигуры.

При некотором повышении освещенности объекта, находящегося прежде в полной темноте, он становится видимым. Сначала будет выявляться цвет красных объектов, а позже других – сине-фиолетовых и желтых. Синие объекты в относительно большем диапазоне освещенности воспринимаются бесцветными и будут незаметными на белом фоне. Красные объекты имеют заметную цветность при любой яркости фона. Это является одной из причин применения красного цвета проникающих жидкостей в капиллярной дефектоскопии.

Глаз, как и любая реагирующая система, обладает инерцией. Время, необходимое для возникновения зрительного ощущения, зависит от длины волны, яркости объекта и составляет 0,025–0,1 с. При осмотре цветных объектов скорость возникновения ощущения и его сила возрастают по мере перехода от цветов коротковолнового участка спектра (фиолетовый) к цветам длинноволнового (красный). Возникшее световое ощущение исчезает не сразу, поэтому быстро движущаяся точка предстает в виде линии, а мелькающий свет при достаточно высокой частоте не отличается от постоянного. Критическая частота мельканий обычно не превышает 50 Гц.

#### *Классификация приборов, используемых при проведении ВОК*

Рассмотрим первую классификацию приборов – по виду приемника лучистой энергии. Всего различают три группы оптических приборов для данной классификации:

- визуальные (в данных приборах в роли приемника выступает человеческий глаз – лупы, обзорные эндоскопы, микроскопы и т.д.);
- детекторные (приборы, у которых в роли приемника используются различные детекторы – люминесцирующие вещества, химические реагенты, спектрометры и т.п.);
- комбинированные (пригодны для визуального обзора объекта, а также для контроля при помощи детектора).

Вторая классификация приборов для проведения ВОК – по назначению:

- приборы для контроля близкорасположенных, мелких объектов (данные объекты находятся в пределах расстояния наилучшего зрения ( $l \leq 250$  мм) – лупы, микроскопы);
- приборы для контроля удаленных объектов ( $l > 250$  мм) – бинокли, телескопические лупы, зрительные трубы;
- приборы для контроля скрытых объектов, закрытых конструкций, осмотра внутренних поверхностей, отверстий и полых деталей (эндоскопы, бороскопы, перископические дефектоскопы).

Третья классификация – по способу использования:

- цеховые (применяются при постоянной температуре от  $+15$  до  $+20^{\circ}$  С, нормальном атмосферном давлении, невысокой влажности);
- полевые (работают в условиях температуры от  $-55$  до  $+60^{\circ}$  С, при вибрациях, тряске и т.д.)

### 4.3. Методы контроля ВОК

Методы контроля рассмотрим на примере 3-х видов.

*Контроль близкорасположенных объектов*

Для выполнения данного вида контроля применяются лупы и микроскопы. Они позволяют обнаруживать трещины различного происхождения, забоины, надиры трущихся поверхностей, риски, поверхностные эрозионные и коррозионные повреждения, выкрашивание материала объекта контроля и прочие поверхностные дефекты. Также могут быть выявлены дефекты лакокрасочных и гальванических покрытий.

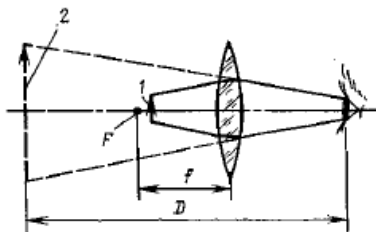
Для того чтобы получить увеличенное изображение, лупу помещают у поверхности контролируемого объекта (рис. 7) таким образом, чтобы расстояние между ними было немного меньше, чем фокусное расстояние лупы.

Рис. 7. Графическая схема осмотра с применением лупы:

$F$  – фокус лупы;  $f$  – фокусное расстояние лупы;

1 – контролируемый объект;

2 – мнимое изображение объекта контроля





Дефектоскопист наблюдает увеличенное прямое мнимое изображение контролируемого объекта (данное изображение получается на расстоянии наилучшего зрения –  $l \leq 250$  мм), т. е. на расстоянии, при котором нормальный человеческий глаз без напряжения отчетливо видит предмет.

Увеличение лупы можно приблизительно посчитать по формуле:

$$\Gamma_{л} = \frac{l}{f} = \frac{250}{f}.$$

При росте увеличения лупы улучшается разрешающая способность зрения (способность глаза различать отдельно близкорасположенные точки, точки и прочие фигуры).

Контроль деталей обычно проводят при помощи луп увеличением от 2 до 10 (это объясняется существенным сокращением поля зрения при больших увеличениях, уменьшением глубины резкости, а также других факторов).

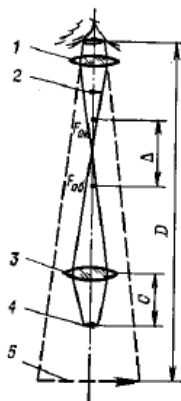
Для поиска крупных дефектов, и проведения общего осмотра применяются обзорные лупы, имеющие большое поле зрения, но малое увеличение.

Оптическая схема микроскопа представлена на рис. 8. Оптические оси объектива и окуляра совпадают.

Рис. 8. Оптическая схема монокулярного микроскопа:

$C$  – рабочее расстояние;  $l$  – расстояние наилучшего зрения;

1 – окуляр; 2 – обратное изображение объекта;  
3 – объектив; 4 – контролируемый объект; 5 – мнимое увеличенное изображение объекта



Полное увеличение микроскопа находится по формуле:

$$\Gamma_{M} = \Gamma_{OB} \cdot \Gamma_{OK},$$

где  $\Gamma_{OB}$  – увеличение объектива ( $\Gamma_{OB} = \Delta / f_{OB}$ );

$\Delta$  – расстояние от заднего фокуса объектива до переднего фокуса окуляра, мм;  $\Gamma_{OK}$  – увеличение окуляра ( $\Gamma_{OK} = l / f_{OK}$ ).

Для проведения контроля используются микроскопы с увеличением в пределах от 8 до 40–50.

Увеличение микроскопов, используемых для осмотра деталей, выше увеличения луп. В случае равного увеличения эффективность микроскопа выше из-за хорошего качества изображения.

Лупы и микроскопы широко используются при капиллярном и магнитопорошковом контроле. Они позволяют обнаруживать более мелкие, чем без применения оптических средств, дефекты – трещины, волосовины, расслоения и др.

### *Контроль удаленных объектов*

Телескопическая схема приборов (состоят из объектива и окуляра), предназначенных для контроля удаленных объектов, аналогична оптической схеме микроскопа (рис. 3), но имеет свое отличие – в телескопической системе задний фокус объектива совмещен с передним фокусом окуляра, а передний фокус объектива и задний фокус окуляра находятся в бесконечности.

Объектив необходим для получения действительного изображения рассматриваемого объекта. В случае значительного удаления объекта лучи, исходящие из любой его точки, практически параллельны. В фокальной плоскости объектива и окуляра получается действительное, обратное и уменьшенное изображение объекта. Наблюдатель, смотря в окуляр, видит обратное мнимое и, как правило, увеличенное изображение удаленного объекта.

Увеличение простейшей телескопической системы находится по формуле:

$$\Gamma_{т.с} = f_{об} / f_{ок}.$$

Для того чтобы получить прямое изображение объекта в телескопических приборах применяются оборачивающие системы. Эти системы состоят из одной или нескольких линз или призм.

Если оборачивающая система имеет линейное увеличение  $\omega$ , то общее увеличение прибора находится по формуле:

$$\Gamma_{m.c} = \omega \cdot \frac{f_{об}}{f_{ок}},$$

Увеличение телескопической лупы образовано комбинацией бинокля или его одной оптической трубки с насадкой и вычисляется по формуле:

$$\Gamma_{m.д} = \frac{250}{f_H} \cdot \Gamma_{m.c},$$

где  $f'_H$  – фокусное расстояние насадки;  $\Gamma_{т.с}$  – увеличение телескопической системы бинокля.

Бинокли бывают двух типов: призмные и галилеевские. У призмных биноклей в зрительных трубках для образования прямого изображения служит оборачивающая система из двух призм.

В галилеевском бинокле в роли окуляра служит рассеивающая линза, она образует прямое изображение. Данные бинокли имеют простую конструкцию и обладают большей светосилой.

Бинокли и телескопические лупы применяются для осмотра увеличенного изображения объектов контроля, которые доступны непосредственному осмотру, но расположены на расстоянии более 0,6–0,8 м от глаза человека, проводящего контроль.

На планере ВС с помощью данных приборов осматривают обшивку стабилизаторов и килей, узлы крепления антенн, каналы всасывания двигателей, а на АД – форсажные коллекторы, лопатки ротора турбины (нераскрывшиеся трещины усталости на лопатках, при выполнении контроля, как правило, не обнаруживаются) и т. д.

#### *Контроль скрытых объектов*

Объекты контроля, недоступные для прямого наблюдения осматривают благодаря применению особых телескопических приборов – эндоскопов. Принцип действия эндоскопа заключается в использовании оптической системы, которая позволяет передавать изображение на значительное расстояние (до нескольких метров). В этих приборах лучи света изменяют свое направление относительно первоначального.

Оптическая схема простого эндоскопа представлена на рис. 9.

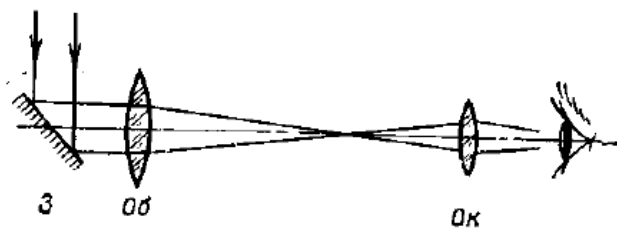


Рис. 9. Схематичное изображение оптической системы эндоскопа:  
Об – объектив; Ок – окуляр; З – зеркало

Угол отклонения лучей можно изменить с помощью отклонения зеркала (призмы). Если положение зеркала изменится на угол  $\alpha$ , то лучи света отклонятся на угол  $2 \cdot \alpha$ .

Зеркало в эндоскопе может находиться в средней части, между объективом и окуляром или в каких-либо других местах оптической системы. Приборы с таким размещением зеркал называются коленчатыми и применяются в том случае, когда каналы для ввода прибора внутрь объекта контроля искривлены.

Важно отметить, что плоские зеркала и призмы не изменяют увеличения телескопической системы.

Эндоскопы бывают:

- линзовые;
- волоконно-оптические;
- комбинированные.

Линзовый эндоскоп представляет собой жесткую конструкцию или имеет «колени» с одной – двумя степенями свободы. Он состоит из источника света (для освещения объекта контроля), сменной призмной или зеркальной насадки (изменяет направление и размеры поля зрения прибора), объектива, основной передающей оптической системы и окуляра. Схема действия линзового эндоскопа представлена на рис. 10.

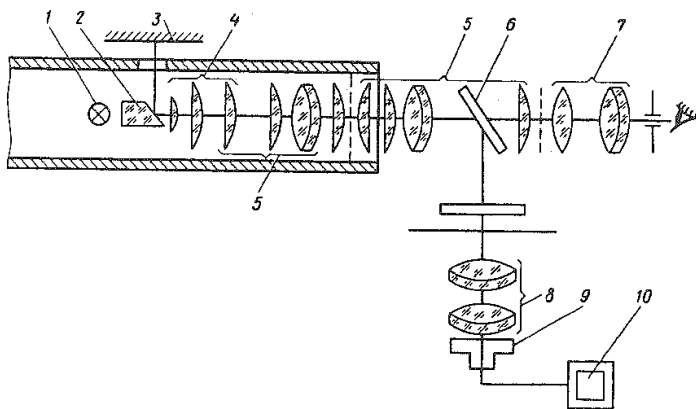


Рис. 10. Схема действия линзового эндоскопа:

- 1 – источник света; 2 – сменная насадка; 3 – поверхность контролируемого объекта; 4 – объектив; 5 – оптическая система; 6 – зеркало; 7 – окуляр;  
8 – объектив; 9 – видикон; 10 – видеосъемка

Сменная оптическая система необходима для увеличения рабочей длины прибора или подключения телевизионной системы наблюдения. Зеркало и объектив предназначены для проектирования изображения поверхности контролируемого объекта

Линзовый эндоскоп конструктивно выполнен в виде корпуса цилиндрической формы, внутри которого размещены элементы прибора.

Основной недостаток данного типа приборов – большие потери света из-за большого количества линзовых элементов (могут достигать до 40–50).

Линзовые эндоскопы позволяют обнаруживать забоины, трещины, царапины, коррозионные пятна и другие дефекты.

Волоконно-оптический гибкий эндоскоп (фиброскоп) представляет собой набор тонких стеклянных светопроводящих нитей, диаметр которых составляет 10–20 мкм, собранных в жгут. Каждый элементарный световод покрыт снаружи тонким слоем (1–2 мкм) стекла с более низким показателем преломления. На границе «световод – оболочка» происходит полное внутреннее отражение света, что обеспечивает его прохождение по световоду с минимальным ослаблением. Спектр пропускания световода определяется свойствами материала, из которого он изготовлен. При уменьшении диаметра элементов световода и увеличении их числа качество изображения улучшается (уменьшается «мозаичность» изображения).

На рис. 11 показана схема действия волоконно-оптического гибкого эндоскопа.

Основное преимущество гибких эндоскопов – это способность передавать изображение без искажения при изгибе по любому криволинейному профилю.

Угол направления наблюдения – угол между осью телесного угла поля зрения и осью эндоскопа (рис. 12, стрелкой изображена ось телесного угла поля зрения  $\alpha$ , а цифрами указан угол направления наблюдения). Эндоскопы могут быть прямого, переднего, заднего и бокового наблюдения, а также кругового и переменного угла наблюдения.

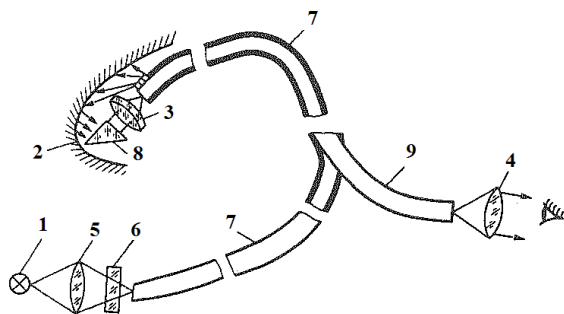


Рис. 11. Схема действия волоконно-оптического гибкого эндоскопа:  
 1 – источник света; 2 – поверхность контролируемого объекта;  
 3 – объектив; 4 – окуляр; 5 – конденсор; 6 – тепловой фильтр;  
 7 – осветительный жгут; 8 – призма; 9 – световод

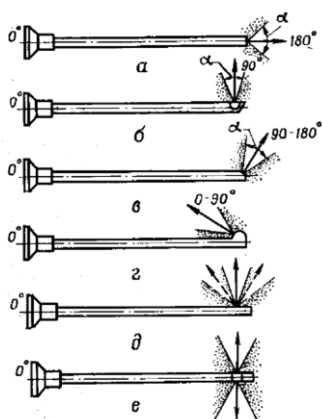


Рис. 12. Типы эндоскопов в зависимости от угла направления наблюдения:  
 а – прямого наблюдения; б – бокового наблюдения; в – переднего обзора;  
 г – заднего обзора; д – переменного угла обзора; е – кругового обзора

Направление осмотра у эндоскопа прямого наблюдения совпадает с направлением луча зрения глаза (угол направления наблюдения для данного эндоскопа –  $180^{\circ}$ ). Для эндоскопа бокового обзора угол направления наблюдения –  $90^{\circ}$ , для переднего обзора – от  $90$  до  $180^{\circ}$ , а у эндоскопов заднего обзора – в пределах от  $0$  до  $90^{\circ}$ . В эндоскопах с переменным углом обзора угол направления может изменяться плавно или ступенчато в определенных пределах при постоянном положении оптической оси рабочей части эндоскопа. Эндоскопы кругового обзора могут производить осмотр участков объектов контроля, которые расположены вокруг продольной оси эндоскопа в пределах  $360^{\circ}$ , при постоянном положении эндоскопа и его объективной части.

Источник света (рис. 13) в гибком эндоскопе – галогенная лампа мощностью 100–300 Вт.

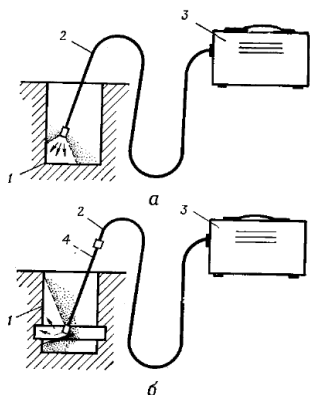


Рис. 13. Применение гибких осветительных жгутов волокон для освещения труднодоступных мест:  
*а* – освещение лучом света; *б* – освещение лучем, отраженным от зеркала;  
*1* – осматриваемая поверхность; *2* – гибкий жгут волокон; *3* – генератор света;  
*4* – жесткий жгут волокон с зеркалом

С помощью конденсатора через тепловой фильтр она освещает торец осветительного жгута, который расположен внутри корпуса эндоскопа, и подсвечивает объект контроля. Источник света располагается вне прибора – это позволяет исключить сильный нагрев прибора.

На рис. 14 наглядно показаны схемы визуальной и осветительной системы гибкого эндоскопа.

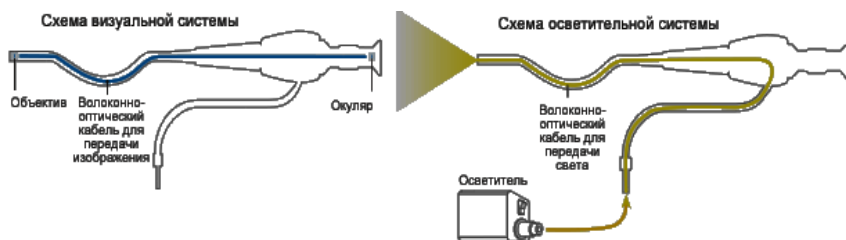


Рис. 14. Схемы визуальной и осветительной системы гибкого эндоскопа

Объект контроля можно визуально наблюдать, а также делать его фотографии (современные эндоскопы имеют возможность видеозаписи процесса проведения контроля).

Эндоскоп конструктивно выполнен в виде блока осветителя со светодиодом длиной 1,5–2,5 м и окуляра. Имеется также механизм дистанционной фокусировки объектива и механизм изгиба передней части эндоскопа (обычно длиной до 100 мм) в пределах  $\pm 100^\circ$  (радиус изгиба достигает 25 мм при диаметре эндоскопа 5–10 мм).

На рис. 15 представлен внешний вид волоконно-оптического гибкого эндоскопа.

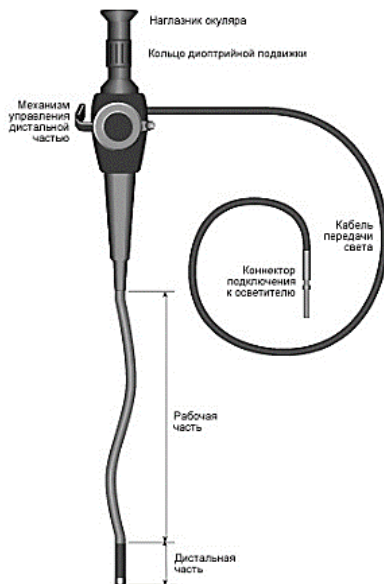


Рис. 15. Внешний вид волоконно-оптического гибкого эндоскопа

Эндоскопы используются для осмотра баллонов гидрогазовых систем ЛА и АД, лопаток ротора компрессора и турбины АД, внутренних полостей гидравлических цилиндров, секций крыла и т. д.

#### 4.4. Технология контроля ВОК

Рассмотрим технологию контроля на примере контроля авиационного ГТД при помощи эндоскопа.

##### *Процесс осмотра*

Осмотр проточной части компрессора и турбины чрезвычайно трудоемок и требует определенных навыков и квалификации.

Рабочая часть эндоскопа с объективом вводится через специальный лючок осмотра в проточную часть компрессора, камеры сгорания или турбины на неработающем двигателе. После фокусировки на исследуемую деталь (например, на переднюю



кромку рабочей лопатки) при перемещении объектива вдоль кромки детали производится ее осмотр.

Поворот ротора двигателя вручную позволяет осмотреть жестким эндоскопом все передние и задние кромки рабочих лопаток. При необходимости осмотра неподвижных лопаток, удаленных от смотровых лучков, внутренней полости камеры сгорания, передних кромок сопловых лопаток первой ступени турбины, возможно использование эндоскопа с гибкой рабочей частью.

При обнаружении повреждения лопатки его величина оценивается с помощью масштабной сетки и сравнения с эталоном или с использованием специального микрометрического устройства и сравнивается с допустимой величиной повреждения для проверяемой лопатки.

#### *Применение транспортных устройств*

С целью повышения эффективности диагностирования с применением эндоскопа применяются различные устройства для транспортировки (доставки) к местам осмотра гибких эндоскопов как со стороны входа в проточную часть ГТД, так и выхода.

Схема доставки эндоскопа к месту осмотра представлена на рис. 16.

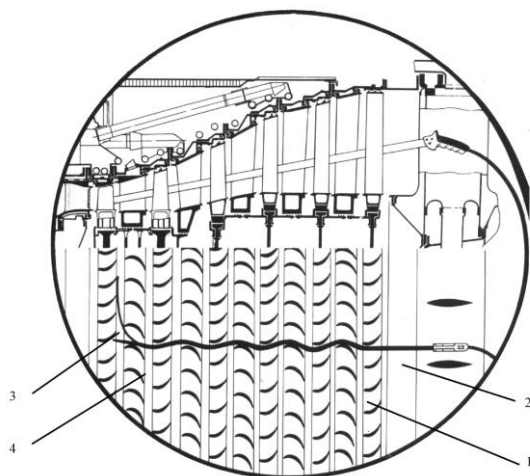


Рис. 16. Схема доставки эндоскопа к месту осмотра:

- 1 – проточная часть лопаточных венцов турбины;
- 2 – транспортное устройство;
- 3 – гибкий эндоскоп;
- 4 – межлопаточный канал

В проточную часть лопаточных венцов турбины (со стороны выхода газов) или венцов компрессора (со стороны входа в авиационный ГТД) вводят вначале само транспортное устройство на требуемое расстояние.

Затем в его внутренний канал вводят и продвигают гибкий эндоскоп. Управляя дистальным концом, заводят эндоскоп в кольцевой межлопаточный канал на всю длину рабочей части.

После этого перемещая эндоскоп в обратном направлении и управляя его дистальным концом, осматривают элементы статора, сопловых лопаток турбины или направляющих лопаток компрессора.

Вариант исполнения транспортного устройства показан на рис. 17.

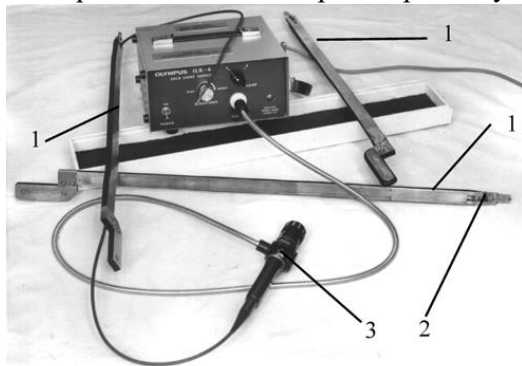


Рис. 17. Транспортные устройства с эндоскопом:  
1 – транспортные устройства; 2 – прорезь для выхода эндоскопа;  
3 – гибкий эндоскоп

### Осмотр проточной части двигателя НК-12МА с помощью эндоскопа

На рис. 18 показаны места расположения смотровых лючков на двигателе.

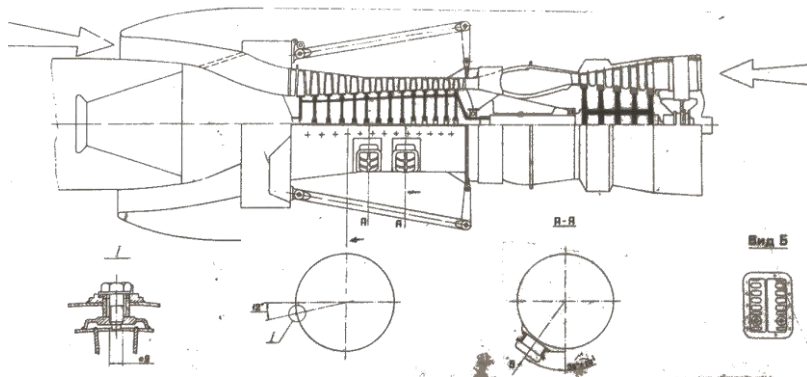


Рис. 18. Места расположения смотровых лючков на двигателе НК-12МА

*Результаты осмотра проточной части с помощью эндоскопа*

При осмотре проточной части двигателя НК-12МА была обнаружена вмятина на выходной кромке рабочей лопатки 14 ступени компрессора глубиной до 1 мм.

На рис. 19 показан снимок РЛ, сделанный эндоскопом при осмотре компрессора.

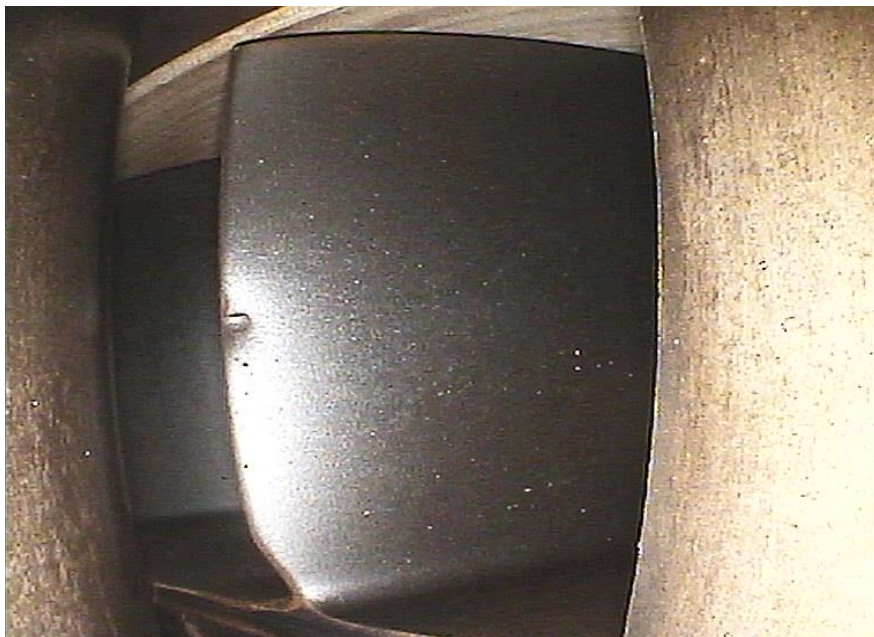


Рис. 19. Вмятина на выходной кромке рабочей лопатки 14 ступени компрессора глубиной до 1 мм

При осмотре проточной части двигателя НК-12МА была обнаружена забоина на входной кромке рабочей лопатки 7 ступени компрессора до 1 мм.

На рис. 20 показан снимок РЛ, сделанный эндоскопом при осмотре компрессора.



Рис. 20. Забоина на входной кромке рабочей лопатки 7 ступени компрессора до 1 мм

При осмотре проточной части двигателя НК-12МА была обнаружена забоина на входной кромке рабочей лопатки 6 ступени компрессора до 1 мм.

На рис. 21 показан снимок РЛ, сделанный эндоскопом при осмотре компрессора.

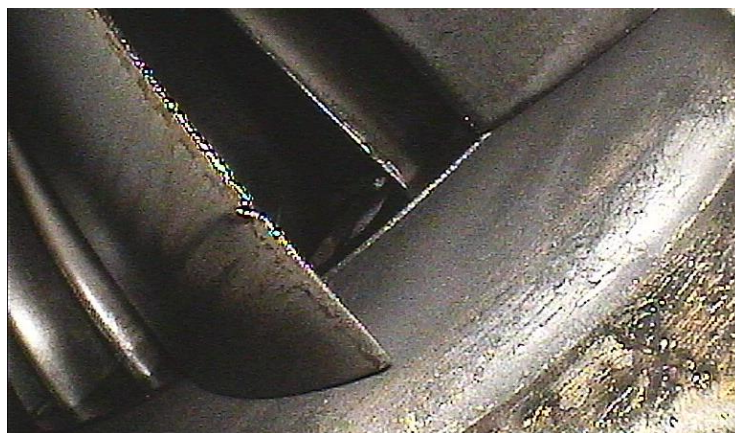


Рис. 21. Забоина на входной кромке рабочей лопатки 6 ступени компрессора до 1 мм

При осмотре камеры сгорания двигателя НК-12МА было обнаружено нарушение ЛКП.

На рис. 22 показан КС, сделанный эндоскопом при осмотре.



Рис. 22. Нарушение ЛКП КС

При осмотре проточной части двигателя НК-12МА была обнаружена забоина на входной кромке рабочей лопатки 9 ступени компрессора до  $1 \times 0,5$  мм.

На рис. 23 показан снимок РЛ, сделанный эндоскопом при осмотре компрессора.



Рис. 23. Забоина на входной кромке рабочей лопатки 9 ступени компрессора до  $1 \times 0,5$  мм

При осмотре проточной части двигателя НК-12МА был обнаружен налет на РЛ 1 ступени турбины.

На рис. 24 показан снимок РЛ сделанный эндоскопом при осмотре турбины.



Рис. 24. Налет на РЛ 1 ступени турбины

## **5. КАПИЛЛЯРНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

### **5.1. Общие сведения**

Метод неразрушающего контроля (КНК) основан на использовании физико-химических свойств жидкости, таких как смачивание, капиллярность, сорбция и диффузия. Он предназначен для выявления слабо видимых или невидимых глазом человека дефектов, которые выходят на поверхность материала.

Основными капиллярными методами КНК являются:

- цветной (метод красок);
- люминесцентный;
- комбинированный (люминесцентно-цветовой).

КНК обычно используют в том случае, когда невозможно применить другие (равноценные по чувствительности) методы НК. Также данный метод применяется для получения дополнительной и уточняющей информации о дефекте (дефектах), обнаруженном другими методами контроля (т. е. дублирование контроля).

Все капиллярные методы применяют при контроле деталей из неферромагнитных материалов (трубопроводы, лопатки

компрессоров и турбин авиационных ГТД, корпусные детали ЛА и т. д.), но также и возможно использование их при контроле стальных деталей (например, когда затруднен магнитный контроль). КНК используется и при проверке неметаллических материалов.

## 5.2. Физические основы КНК

В КНК используется способность специальных жидкостей проникать в полость дефекта и удерживаться в нем, а после извлекаться на поверхность благодаря явлению капиллярности. Удержание жидкости в полости трещины происходит под действием силы сцепления, которая, в свою очередь, определяется смачивающими свойствами. В том случае, когда взаимодействие между молекулами твердого тела и жидкости больше, чем между молекулами жидкости, происходит смачивание поверхности.

*Смачивание* – поверхностное явление, возникающее при соприкосновении жидкости с твердым телом, и зависит как от свойств жидкости, так и от свойств твердого тела. Проявление смачивания – способность жидкости растекаться по горизонтальной поверхности твердого тела.

Различают статическое (при нем линия границы смачивания неизменна) и кинетическое (перемещение границы смачивания по поверхности твердого тела) смачивание.

При статическом смачивании капля жидкости принимает на поверхности твердого тела форму линзы (рис. 25).

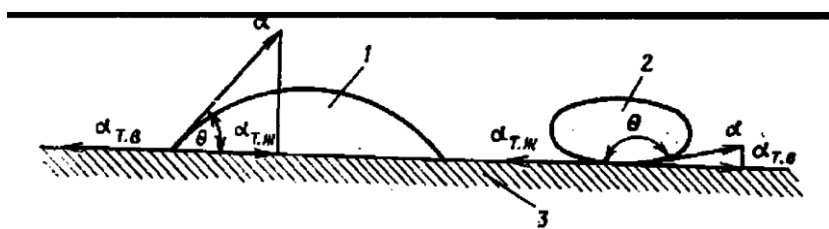


Рис. 25. Капля жидкости на горизонтальной поверхности твердого тела:  
 1 – капля смачивающей жидкости; 2 – капля несмачивающей жидкости;  
 3 – поверхность твердого тела

Если силы взаимодействия между молекулами твердого тела и жидкости превышают силы взаимодействия между молекулами

жидкости, то жидкость хорошо смачивает поверхность – прилипает к поверхности. Капля жидкости, которая нанесена на поверхность твердого тела, «неограниченно» растекается и образует «пятно» значительного размера. В случае плохой смачивающей способности капля жидкости остается на поверхности без каких-либо изменений своих начальных размеров.

Мера смачивания – косинус краевого угла смачивания  $\Theta$ , который образован поверхностью твердого тела и плоскостью, касательной к поверхности жидкости в точке границы смачивания.

Косинус краевого угла рассчитывается по формуле:

$$\cos \Theta = \frac{1}{\alpha \cdot (\alpha_{т.в.} - \alpha_{т.ж.})}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – поверхностное натяжение на границе «жидкость-воздух»;  $\alpha_{т.в.}$  – поверхностное натяжение на границе «твердое тело-воздух»;  $\alpha_{т.ж.}$  – поверхностное натяжение на границе «твердое тело-жидкость».

Чем больше косинус краевого угла, тем меньше краевой угол и, следовательно, лучше смачивание. Если косинус краевого угла приближается к единице, наблюдается полное смачивание, и краевой угол уменьшается, стремясь к нулю. Избыток жидкости безгранично растекается по поверхности твердого тела. Если косинус краевого угла равен  $-1$ , то наблюдается полное несмачивание, и жидкость не вступает в физико-химическое взаимодействие с твердым телом.

Жидкости с малым поверхностным натяжением обеспечивают лучшее смачивание, это видно из формулы (1).

Стоит отметить, что на смачивающую способность жидкости значительное влияние оказывает состояние поверхности твердого тела – шероховатость, температура и жировые пленки.

Шероховатые поверхности лучше смачиваются, чем гладкие (некоторые масла растекаются по шероховатой поверхности, но не растекаются по полированной). Так как у стенок трещин шероховатость выше, чем у обработанной поверхности, то следует ожидать, что в чистых полостях трещин у жидкостей будет более высокая смачивающая способность по отношению к поверхности твердого тела.

Повышение температуры будет способствовать повышению смачивающей способности жидкости.



Капиллярные явления обусловлены наличием поверхностного натяжения жидкости.

Рассмотрим наиболее простое явление – всасывание жидкости в узкие трубки (капилляры), поры и щели со смачиваемыми стенками (рис. 26).

Всасывание (рис. 26, а) происходит под действием капиллярного давления  $p$  (разности давлений по обе стороны мениска – искривленной поверхности жидкости).

Капиллярное давление вычисляется по формуле:

$$p = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \cos \Theta}{r},$$

где  $r$  – радиус средней кривизны мениска (равен радиусу капилляра).

Смачивающие жидкости заполняют полости любых форм, при условии, чтобы размеры полостей способствовали образованию жидкостью мениска сплошной кривизны без плоских участков.

Несмачивающие жидкости выталкиваются из полостей (рис. 26, б).

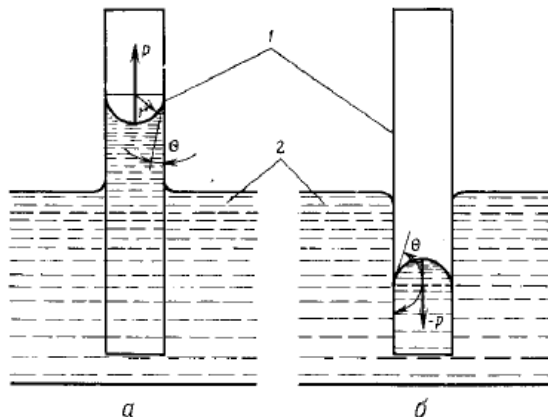


Рис. 26. Изменение уровня жидкости в узких трубках-капиллярах:  
 а – при смачивании; б – при несмачивании;  
 1 – трубка-капилляр; 2 – жидкость

Смачивающая жидкость под действием капиллярных сил заполняет полости трещин и других поверхностных дефектов (рис. 27).

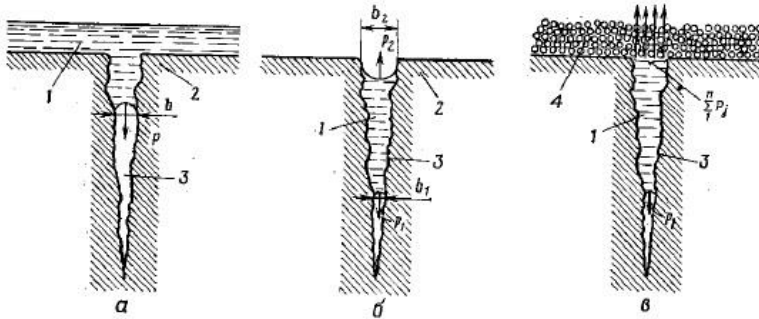


Рис. 27. Заполнение жидкостью полости трещины:  
*a* – наличие смачивающей жидкости; *б* – отсутствие смачивающей жидкости; *в* – наличие пористого вещества; 1 – жидкость;  
 2 – поверхность детали; 3 – полость трещины;  
 4 – пористое вещество

В случае наличия жидкости на поверхности детали в полости трещины образуется один мениск (рис. 27, *a*).

В этом случае капиллярное давление будет равно:

$$p = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \cos \Theta}{b},$$

где  $b$  – ширина трещины на уровне мениска.

При испарении или удалении жидкости с поверхности (рис. 27, *б*) в полости трещины возникают два мениска, они вызывают появление двух капиллярных давлений, которые действуют в прямо противоположных направлениях (рис. 28).

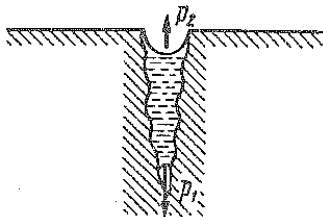


Рис. 28. Капиллярные давления

Жидкость будет продолжать движение в полость трещины под действием разности давлений  $p_1 - p_2$ :

$$p_1 - p_2 = 2 \cdot \alpha \cdot \cos \Theta \cdot \left( \frac{1}{b_1} - \frac{1}{b_2} \right),$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – ширина трещины на уровне расположения соответственно первого и второго менисков.

Жидкость, которая заполнила полость трещины, удерживается в ней капиллярным давлением, даже если ее преднамеренно удалять с поверхности детали, но если на мениск, расположенный у поверхности, наложить пористое вещество в виде порошка или краски, то вместо этого мениска в порах наложенного вещества образуется целая система малых менисков большой кривизны и различной формы (рис. 3, в).

Каждый мениск будет создавать капиллярное давление  $p_j$ . Это давление значительно превышает давление  $p_1$  и действует в противоположном направлении.

Далее, под действием суммы давлений  $\sum_1^n p_j$ , жидкость покидает полость трещины и поднимается на поверхность детали ( $n$  – количество менисков, которые образовались в порах наложенного вещества).

Выход жидкости из полости дефекта под действием капиллярных давлений сопровождается такими явлениями, как сорбция и диффузия.

*Сорбция* – физико-химический процесс поглощения каким-либо телом-поглотителем газов, паров или также растворенных веществ из окружающей среды.

Различают адсорбцию (поглощение веществ происходит только на поверхности поглотителя) и абсорбцию (вещества поглощаются всем объемом поглотителя).

Характер сорбционных процессов зависит от типа и физических свойств жидкости и пористого вещества (поглотителя).

*Диффузия* – самопроизвольно протекающий процесс выравнивания в некотором объеме концентрации молекул, ионов или других растворенных или взвешенных частиц под влиянием их теплового хаотического движения.

Количество диффундирующего вещества растет при повышении температуры. Если при этом жидкость в поглотителе и в полости

трещины не испаряется, то ее количество в пористом веществе увеличивается.

При люминесцентном методе след индикаторной жидкости наблюдается в ультрафиолетовых лучах, а при цветном методе (метод красок) изображения дефекта обнаруживается в обычном дневном (монохроматическом) свете.

### **5.3. Материалы, используемые при проведении КНК**

*Пенетрант.* В качестве него используют различные жидкие растворы на основе керосина, в который добавляются красители (или люминофоры, которые светятся под действием ультрафиолетового излучения).

В состав пенетранта «А» входят следующие вещества: керосин (700 мл), бензин Б-70 (300 мл) и темно-красный краситель (30 г).

Люминесцирующие пенетранты – смеси органических растворителей, керосина с добавками люминесцирующих веществ (нефти, масел и др.).

*Очищающая жидкость.* Необходима для удаления пенетранта с поверхности объекта контроля. Используются вода, органические растворители, смеси масла с керосином и др.

*Гаситель.* Необходим для устранения окраски или люминесцентных остатков пенетранта без его удаления с контролируемого объекта. В качестве гасителей используется вода с кальцинированной содой (O<sub>201</sub>) и другие вещества.

*Проявляющее вещество.* Используются для фиксации дефектов на поверхности контролируемого объекта. Применяются материалы, абсорбирующие пенетрант, который проник в дефекты (крахмал, порошок окиси магния и т. д.).

### **5.4. Технология контроля КНК**

Наиболее распространенным является цветной метод, поэтому рассмотрим технологию контроля с помощью данного метода.

Контроль деталей с помощью КНК состоит из следующих операций:

- подготовка контролируемого объекта к контролю;
- нанесение индикаторной жидкости (пенетранта);

- удаление индикаторной жидкости (пенетранта) с поверхности контролируемого объекта;
  - нанесение проявителя на поверхность контролируемого объекта;
  - осмотр объекта контроля;
  - удаление проявителя с поверхности контролируемого объекта.
- Основные этапы контроля КНК представлены на рис. 29.

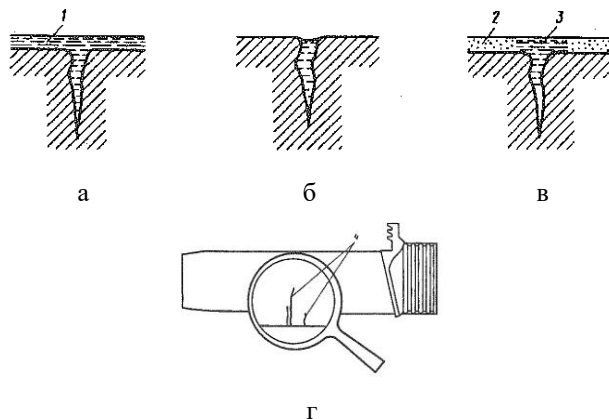


Рис. 29. Основные этапы контроля деталей с помощью КНК:  
*a* – проникающая жидкость заполнила полость трещины; *б* – проникающая жидкость удалена с поверхности объекта контроля; *в* – на контролируемый объект нанесена проявляющая краска, над трещиной образован индикаторный рисунок; *г* – определение информативных параметров (трещин); *1* – проникающая жидкость; *2* – проявляющая краска; *3* – индикаторный рисунок; *4* – трещина

Далее рассмотрим перечисленные операции более подробно.

Перед проведением контроля необходимо провести *предварительную подготовку* контролируемого объекта. Предварительная подготовка заключается в следующем: контролируемый объект нужно тщательно очистить от загрязнений: масла, влаги и льда, пыли, нагара, окисных пленок, продуктов коррозии, смолистых отложений, консервационных составов, а также от других веществ, которые находятся на поверхности объекта контроля, заполняющих или перекрывающих полости дефекта (дефектов).

Кроме загрязнений удалению подлежат декоративные и защитные покрытия (они препятствуют обнаружению несплошностей основного материала объекта контроля и создают ложные дефекты).

Способ очистки выбирается такой, чтобы была возможность удалить загрязнения из полостей дефектов без внесения в них новых. Наиболее часто высокое качество очистки достигается с помощью комбинации двух или более способов. После очистки на поверхности контролируемого объекта и в полостях дефектов должны оставаться только легколетучие вещества, удаляемые при сушке.

Наиболее простой способ сушки объекта контроля – выдержка его на воздухе в течение определенного количества времени (данный способ сушки применим при проведении КНК в полевых условиях). На сегодняшний день сушка проводится в сушильных шкафах при специальной температуре (температура сушки зависит от материала контролируемого объекта). Следует учесть, что при превышении температуры сушки тонкая пленка окислов, образующаяся не только на поверхности объекта контроля, но и в полостях дефектов, уменьшает ширину их раскрытия или может полностью перекрыть их полости (рис. 30).

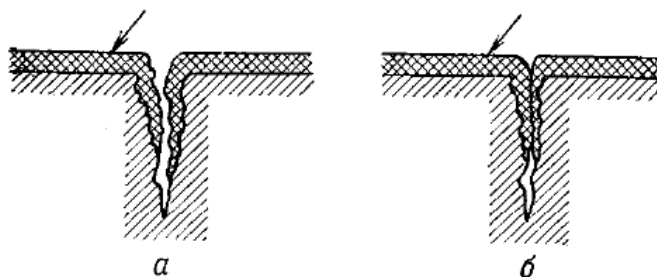


Рис. 30. Окисная пленка (показана стрелкой) на поверхности объекта контроля и в полости трещины: *a* – уменьшение раскрытия трещины пленкой; *б* – перекрытие полости трещины пленкой

После подготовки контролируемого объекта к контролю идет операция по нанесению индикаторной жидкости (пенетранта) на его поверхность.

Простым и наиболее широко применяемым способом заполнения полостей дефектов пенетрантом является аэрозольный. На контролируемую поверхность при помощи опрыскивания наносят жидкость и далее выдерживают ее определенное время (для заполнения полостей дефектов под действием капиллярных сил). Поверхность объекта контроля при этом остается смоченной.

Далее после выдержки контролируемого объекта под слоем пенетранта в течение определенного времени его удаляют с контролируемой поверхности. Пенетрант необходимо удалить для того, чтобы не допустить появления окрашенного фона на бездефектной поверхности контролируемого объекта (пенетрант удаляют с помощью масляно-керосиновой смеси). Очиститель наносят на поверхность контролируемого объекта кистью, разбрызгиванием или окунанием сразу после нанесения последнего слоя (не допуская его высыхания). После этого поверхность протирают сухой чистой ветошью. Качество удаления пенетранта проверяют визуально при осмотре контролируемого объекта.

Далее после этого на поверхность наносят проявляющий состав. Существует множество способов нанесения проявителя, вот наиболее распространенные из них – напыление, распыление, кистевой, окунание (погружение).

После проявления дефекта (дефектов) на объекте контроля проводят его осмотр для обнаружения индикаторного рисунка. Данная операция осуществляется при высокой освещенности в месте проведения контроля.

Осмотр контролируемых объектов проводится в два этапа.

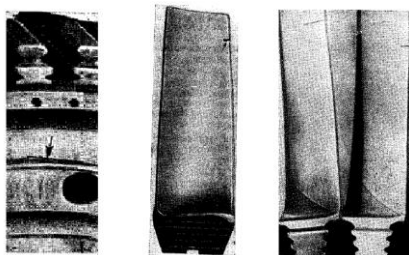
1 этап – осмотр поверхности с целью поиска индикаторного рисунка. Осмотр проводится невооруженным глазом или при помощи луп (с большим полем зрения и малым увеличением).

2 этап – анализ рисунка. При анализе индикаторного рисунка используют, как правило, различные оптические средства.

В основном при выполнении осмотра и анализа используется один и тот же оптический прибор.

Вид дефекта определяется по особенностям индикаторного рисунка и его месту на контролируемом объекте.

Усталостные трещины выявляются чаще всего в виде одиночных изломанных линий, которые расположены в местах концентраторов напряжений – отверстий, галтелей, пазов и т. д., а также поперек кромок и ребер (рис. 31).



*а*

*б*

*в*

Рис. 31. Усталостные трещины:

*а* – усталостная трещина в диске турбины; *б, в* – усталостные трещины и точечные эрозионные поражения на рабочих лопатках турбины

Заковы и соответствующие им линии рисунка могут иметь случайное направление (рис. 32).

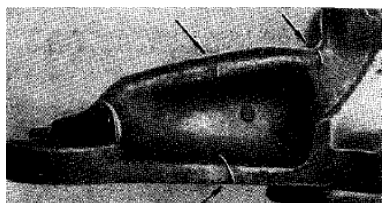


Рис. 32. Заковы на ребрах жесткости кронштейна (показаны стрелками)

Коррозионные трещины под напряжением имеют большое количество ответвлений и изломов (рис. 33).



Рис. 33. Коррозионные трещины под напряжением (контролируемый объект – реборда колеса шасси ЛА)



Волосовины выявляются в виде линий, ориентированных вдоль волокон металла, вдоль направления его деформации при изготовлении детали. Если волокна металла изогнуты, волосовины следуют за их направлением (рис. 34).

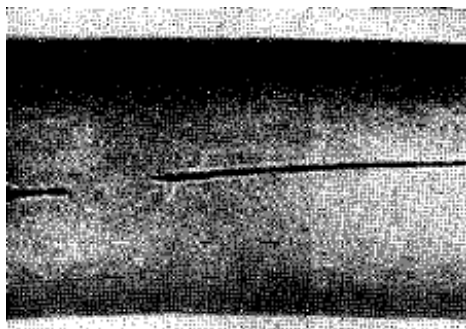


Рис. 34. Волосовина в материале трубопровода гидрогазовой системы ЛА

Индикаторный рисунок неслитин в виде одиночных или группы линий соответствует направлению потоков металла при литье (рис. 35).

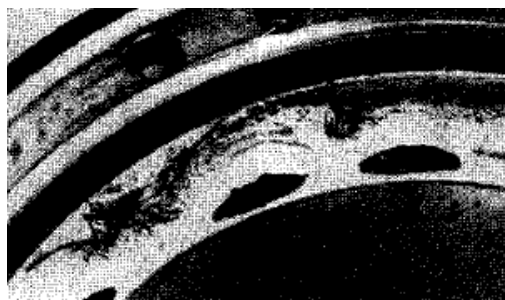
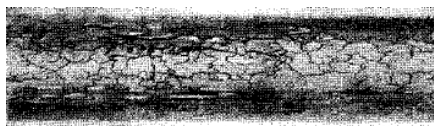


Рис. 35. Неслитины (контролируемый объект – барабан колеса шасси ЛА)

На рис. 36 показаны трещины ползучести, на рис. 37 – примеры выявления растрескивания материала и шлифовочных трещин.



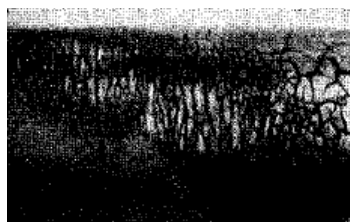
Рис. 36. Трещины ползучести на рабочей лопатке турбины



*a*



*б*



*в*

Рис. 37. Примеры растрескивания и шлифовочных трещин контролируемых объектов: *a* – растрескивание объекта контроля из алюминиевого сплава под воздействием высокой температуры; *б* – растрескивание гальванического покрытия рабочей форсунки АД (10-кратное увеличение); *в* – шлифовочные трещины на хромированной поверхности

Эрозионные поражения (рис. 31, в) проявляются в виде группы коротких линий или сетки (растрескивание материала, межкристаллическая коррозия крупнозернистых сплавов), в виде точек, звездочек (поры, язвенная коррозия, эрозия), в виде пятен, размытых полос (межкристаллическая коррозия мелкозернистых сплавов). Такой рисунок считают основным признаком данного соответствующего дефекта.

Индикаторный рисунок на поверхности контролируемого объекта может возникать не только в местах дефектов, он может появиться при наличии загрязнений поверхности, а также различных допустимых повреждений.

Схожий с трещинами рисунок образуют заусенцы (в особенности смятые), риски; сколы окислов пленки; коррозия в местах линейного контакта деталей; эрозионные поражения; цепочки забоин, пор; галтели малого радиуса, следы резцов, протяжек; следы полимеризовавшихся масел и смазок, клея, лакокрасочных покрытий; следы засохшего пенетранта (рис. 38) и т. д. Обнаружение рисунка, который соответствует рассмотренным ранее основным признакам дефектов, еще не является причиной для забраковки объекта контроля.

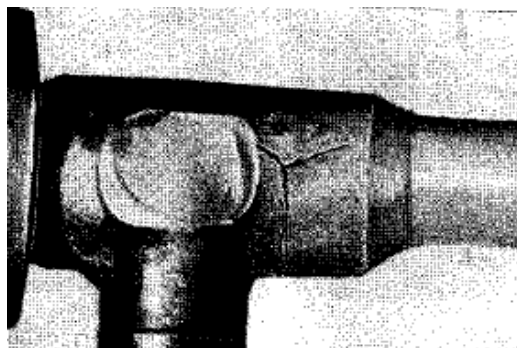


Рис. 38. Индикаторный рисунок ложной трещины (показан стрелкой)

При выполнении контроля исполнитель должен руководствоваться рядом дополнительных признаков, чтобы правильно поставить окончательный вердикт о годности объекта контроля (отсутствие недопустимых дефектов).

Дополнительными признаками отличия индикаторного рисунка действительного дефекта от ложного являются:

- место расположения рисунка (относительно узлов колебания, концентраторов напряжения);
- направление линий рисунка относительно действующих нагрузок и оси детали;
- наличие изломов и разветлений, конфигурация линий рисунка;
- четкость и степень подобия контуров (границ) рисунка;
- яркость и цвет, насыщенность окраски;
- скорость образования рисунка и характер его изменения с течением времени;
- микрорельеф поверхности слоя проявляющей краски в зоне рисунка;
- наличие подобного рисунка в соседних зонах контролируемого объекта.

Данные признаки рассматривают последовательно в изложенном порядке при анализе индикаторного рисунка (для определения характера рисунка необязательно анализировать все признаки, как правило, достаточно рассмотреть первые два-три).

Для более детального восприятия рассмотрим, чем схожи и чем отличаются индикаторные рисунки трещин усталости и следы полимеризовавшихся смазок и масел на примере рабочей лопатки I степени компрессора ГТД.

Усталостные трещины для данного примера имеют развитие по галтели перехода замка к перу (со стороны корытца) или на кромках лопатки и направлены вдоль галтелей или поперек кромок.

Индикаторный рисунок имеет изломы, линии данного рисунка четкие, границы подобны одна другой. В зоне трещины микрорельеф слоя проявляющей краски соответствует неповрежденной детали (при условии, что деталь не находится на грани разрушения и трещина не раскрыта). На рис. 39 показан индикаторный рисунок для данного вида дефекта.

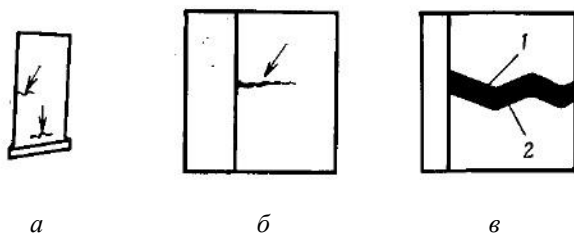


Рис. 39. Индикаторный рисунок усталостных трещин на РЛ компрессора:  
*a* – место расположения рисунка и направление его линий; *б* – наличие изломов линий рисунка; *в* – степень подобия границ линий

Следы полимеризовавшихся смазок и масел, которые не были удалены при очистке зоны контроля, могут образовывать рисунок, очень схожий с рисунком трещины. Загрязнения выявляются в виде линий, расположенных на входной кромке, корытце или спинке рабочей лопатки. Границы линий рисунка подобны одна другой. Расположенные у торцевой кромки линии могут иметь изгибы и изломы, и они ориентированы по направлению воздушного потока – под острым углом к входной кромке или также вдоль торцевой кромки рабочей лопатки. Расположенные в средней части линии не имеют разветвлений и изломов. После выполнения операции по удалению краски на поверхности объекта контроля наблюдается тонкая полоса, трудноудаляемая при помощи органических растворителей. При проведении повторного контроля после удаления данной полосы с поверхности контролируемого объекта индикаторный рисунок больше не образуется.

Для следов полимеризовавшихся смазок и масел индикаторный рисунок показан на рис. 40.

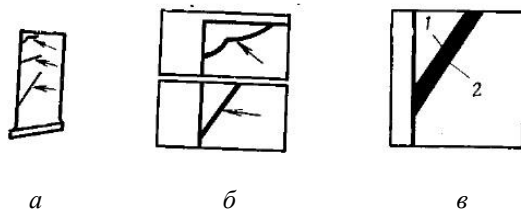


Рис. 40. Индикаторный рисунок следов полимеризовавшихся смазок и масел на РЛ компрессора: *a* – место расположения рисунка и направление его линий; *б* – наличие изломов линий рисунка; *в* – степень подобия границ линий

## 6. МАГНИТНЫЙ МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

### 6.1. Общие сведения

Магнитный метод неразрушающего контроля (МНК) основан на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектами в контролируемом объекте.

Применение данного метода ограничивается только деталями и изделиями, которые изготовлены из ферромагнитных материалов, находящихся в намагниченном состоянии.

Этот контроль позволяют определять только подповерхностные и поверхностные дефекты, залегающие в ферромагнитных материалах на не большой глубине.

МНК обеспечивает выявление дефектов в деталях после окраски или нанесения металлического немагнитного покрытия (хромирования, кадмирования и т. д.), а также оксидирования. Покрытия толщиной не более 15–20 мкм практически не влияют на выявляемость дефектов, а при увеличении их толщины – выявляемость резко ухудшается.

### 6.2. Физические основы МНК

Магнитный контроль основан на индикации с помощью определенного метода магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектом деталей, предварительно намагниченных.

Магнитный поток в той части контролируемого объекта, где нет дефекта, не меняет свое направление. Но в том случае, если на его пути встретятся участки с пониженной магнитной проницаемостью – различные дефекты, то часть магнитных линий выходит за контур объекта контроля (рис. 41).

В том месте, где магнитные линии выходят за контур и входят обратно, возникают местные магнитные полюсы  $N$  и  $S$ , а также поле рассеяния над дефектом.

Это магнитное поле неоднородно, и поэтому на  $Fe$ -частицы, попавшие в него, действует сила, стремящаяся затянуть их к месту с наибольшей плотностью магнитных силовых линий – к месту расположения дефекта.

В случае, когда в качестве объекта фиксации дефекта выступает порошок (магнитопорошковый контроль), будет происходить осаждение порошка в районах магнитных полюсов, образовавшихся

на границах дефекта, которое и будет указывать на его месторасположение и протяженность.

Далее рассмотрим такие понятия, как напряженность магнитного поля  $H_0$  (векторная величина, характеризующая интенсивность и направление магнитного поля в каждой точке без учета магнитных свойств среды) и магнитная индукция  $B_0$  (векторная величина, характеризующая интенсивность и направление магнитного поля в каждой его точке; зависит от магнитных свойств материала объекта контроля). С помощью них определяется магнитное состояние материала в равномерно намагниченной детали.

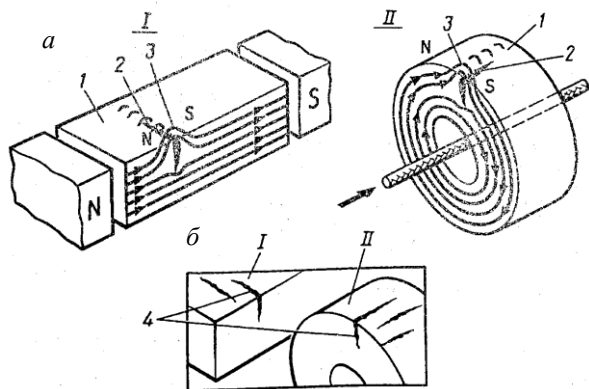


Рис. 41. Схема образования магнитных полей рассеяния:  
*a* – поле рассеяния над трещинами; *б* – осевший над дефектами порошок;  
*1* – деталь; *2* – трещина; *3* – поле рассеяния; *4* – информативный параметр

$H_0$  и  $B_0$  связаны между собой зависимостью:

$$B_0 = \mu_0 \cdot (H_0 + M),$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная (проницаемость), г/м;  $M$  – намагниченность, А/м.

Магнитная постоянная (проницаемость) – это величина, характеризующая способность материалов намагничиваться.

Намагниченность  $M$  – векторная физическая величина, характеризующая состояние материала при его намагничивании.

Намагниченность находится по формуле:

$$M = \lim_{V \rightarrow 0} \left( \frac{\sum m}{V} \right),$$

где  $m$  – элементарный магнитный момент;  $V$  – намагничиваемый объем.

Величины  $H_0$  и  $B_0$  будут увеличиваться на значения  $\Delta H$  и  $\Delta B$  вследствие перераспределения магнитного потока индукции под дефектом (уменьшение сечения). Это изменение магнитного состояния материала в месте дефекта определяется дифференциальной магнитной проницаемостью  $\mu_d$ .

При низких значениях проницаемости и высоких значениях индукции в материале контролируемого объекта достигается выход максимального магнитного потока поля рассеяния дефекта. Это осуществляется, когда напряженность внешнего магнитного поля достаточна для создания в материале объекта контроля значения  $B_{max}$ .

Чем меньше величина магнитной проницаемости  $\mu_d$ , тем большая часть магнитного потока выйдет на поверхность контролируемого объекта, образуя поле дефекта.

Оптимальное условие обнаружения дефектов материала – расположение магнитных силовых линий параллельно поверхности, а дефекта – под углом к силовым линиям.

Необходимо отметить, что при выборе режимов контроля, обеспечивающих максимальные размеры полей рассеяния над дефектами, необходимо учитывать зависимость магнитных характеристик материала от напряженности намагничивающего поля.

Магнитный поток  $\Phi$  – это величина, равная в однородном магнитном поле произведению магнитной индукции на площадь поперечного сечения магнитопровода.

Ферромагнитные свойства металлов обусловлены внутренними молекулярными токами, в основном вращением электронов вокруг собственной оси. В ферромагнитных телах в пределах малых областей – доменов – магнитные моменты молекулярных токов имеют одинаковое направление, поэтому домены оказываются самопроизвольно намагниченными.

В случае отсутствия внешнего магнитного поля в контролируемом объекте магнитные поля доменов направлены произвольно и компенсируют одно другое (суммарное магнитное



поле доменов и намагниченность объекта контроля в этом случае равны нулю). Если на тело действует внешнее поле, под его влиянием поля отдельных доменов устанавливаются по направлению между доменами. Образуется общее магнитное поле доменов и тело оказывается намагниченным (рис. 42).

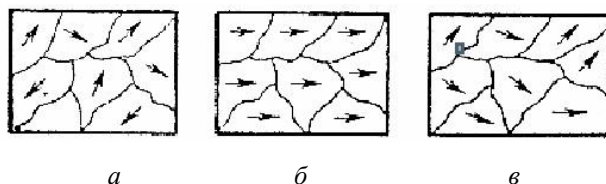


Рис. 42. Направление намагниченности доменов в объекте контроля:  
*a* – размагничен; *б* – намагничен до индукции насыщения; *в* – намагничен до остаточной индукции

Намагниченность материала характеризует степень согласованной ориентировки доменов. Происходит наложение магнитного поля доменов на внешнее магнитное поле, и образуется результирующее магнитное поле в контролируемом объекте. Индукция результирующего поля равна сумме индукции молекулярных токов и индукций внешнего поля.

На рис. 43 представлена основная кривая намагничивания.

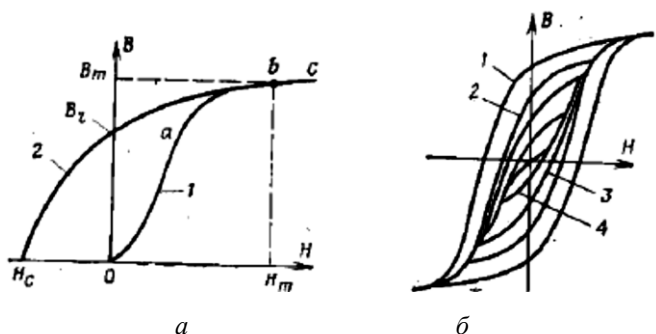


Рис. 43. Основная кривая 1 намагничивания, часть предельной петли 2 гистерезиса (*a*) и семейство симметричных петель 1, 2, 3 и 4 гистерезиса (*б*)

При увеличении от нуля напряженности  $H$  индукция  $B_v$  в материале изменяется по кривой 1 (рис. 43, *a*), которая на участке  $Oa$  растет интенсивно. Далее скорость нарастания индукции падает, и на участке  $bc$  намагниченность материала практически не увеличивается, так как при этом векторы намагниченности всех доменов материала уже ориентированы в одном направлении по внешнему полю; наступает насыщение.

Индукцией насыщения  $B_m$  называется индукция в материале при достижении им магнитного насыщения.

При циклическом изменении напряженности внешнего магнитного поля от  $-H$  до  $+H$  и от  $+H$  до  $-H$  индукция в контролируемом объекте изменяется по замкнутой кривой, симметричной относительно начала координат – гистерезисному циклу.

Перемагничивание может происходить по предельной петле 1 или частным петлям гистерезиса 2, 3, 4 (рис. 43, *b*) в зависимости от амплитуды  $H$ .

При снятии внешнего поля (рис. 43, *a*) индукция в контролируемом объекте уменьшается от индукции насыщения  $B_m$  до остаточной индукции  $B_r$  из-за частичной дезориентации магнитных полей доменов.

Для того чтобы снять остаточную индукцию, нужно к объекту контроля приложить поле некоторого значения  $H_c$  обратного направления (напряженность  $H_c$  называется коэрцитивной силой).

Магнитно-мягкими называются материалы, которые после снятия поля оказываются слабо намагниченными, а магнитно-твердыми – материалы, которые остаются сильно намагниченными после снятия поля.

Рассмотрим более подробно процесс обнаружения дефектов при выполнении МНК.

Магнитный поток, распространяясь по изделию и встречая на своем пути препятствие (в виде поверхностного дефекта), огибает его. Это происходит потому, что магнитная проницаемость дефекта значительно ниже магнитной проницаемости основного металла.

Часть магнитных силовых линий обрывается на одной грани дефекта и снова начинается на другой (см. рис. 44, *a*).

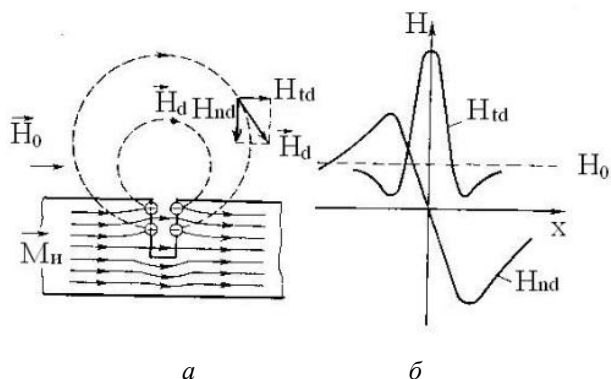


Рис. 44. Распределение намагниченности  $M$  в ферромагнитном изделии и поля рассеяния  $H_d$  над поверхностным дефектом (а) и топография (б) тангенциальной  $H_{td}$  и нормальной  $H_{nd}$  составляющих напряженности поля дефекта

Один конец каждой линии можно рассматривать как некоторый положительный магнитный заряд, а другой – как отрицательный магнитный заряд. Каждый магнитный заряд создает магнитное поле, направленное из него как из центра. Суммарное поле магнитных зарядов  $H_d$  – это поле дефекта. Оно имеет сосредоточенный характер, поэтому результирующее поле, состоящее из внешнего намагничивающего поля  $H_0$  и поля дефекта  $H_d$ , становится неоднородным.

Амплитудные значения составляющих поля дефектов зависят от соотношения проницаемостей среды и дефекта, от ориентации и размеров дефектов по отношению к внешнему полю, и от расстояния до точки наблюдения.

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

В случае, когда вектор намагничивающего поля направлен перпендикулярно плоскости дефекта, поле дефекта совпадает с внешним полем по направлению и имеет свое максимальное значение. В обратном случае поле  $H_d$  ориентируется в направлении нормали к стенкам трещины, а интенсивность его быстро убывает с увеличением угла между нормалью и направлением намагничивания.

Магнитное поле рассеяния возникает не только над дефектом, но и над любыми локальными изменениями однородности магнитных свойств.

На рис. 45 показано поле цилиндрического отверстия диаметром  $D$  как модель внутреннего дефекта.

Поле рассеяния становится заметным только при превышении некоторого порогового значения  $H_0$ , тем большего, чем глубже расположен дефект.

Амплитудное значение поля дефекта определяется режимом намагничивания (величиной  $H_0$ ), глубиной залегания и размерами дефекта. При неизменной глубине залегания отверстия поле меняется в слабых магнитных полях обратно пропорционально квадрату диаметра  $D$  и обратно пропорционально  $D$  в сильных полях.

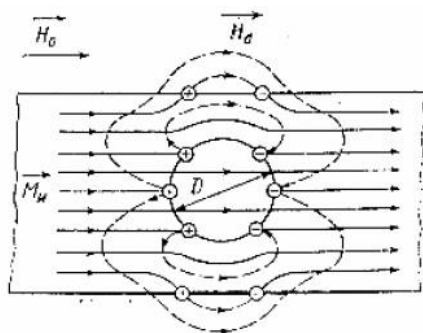


Рис. 45. Распределение намагниченности в ферромагнитном изделии и поля рассеяния над внутренним дефектом

В переменном магнитном поле дефекты сплошности среды вызывают локальное изменение вектора напряженности магнитного поля  $H$ , в первом приближении аналогичное рассмотренному выше для постоянного магнитного поля. Однако из-за скин-эффекта информация может быть получена только о дефектах, залегающих сравнительно неглубоко.

### Технология проведения контроля

#### *Подготовка контролируемого объекта к контролю*

Перед выполнением контроля с проверяемой поверхности контролируемого объекта удаляют загрязнения, нагар, продукты коррозии, влагу и т. п.

Особенно внимательно необходимо очищать от эксплуатационных загрязнений сварные швы, впадины резьбы и галтели болтов.

Участки контролируемого объекта, на которые устанавливают электроконтакты дефектоскопа (при намагничивании пропусканием тока), зачищают мелкой наждачной бумагой и обезжиривают бензином для того, чтобы предотвратить прижог.

Отверстия, через которые магнитная суспензия может затечь во внутренние полости контролируемого объекта (в подшипники, золотниковые пары), закрывают ветошью, пленкой или густой смазкой.

Также необходимо удалить влагу с объекта контроля. Это делается с помощью обдувки струей сухого воздуха или протиркой чистой ветошью.

Наличие ЛКП толщиной более 30 мкм уменьшает чувствительность контроля и поэтому ЛКП толщиной более 30 мкм удаляют, применяя для этого специальные жидкости или ацетон. Крайне не рекомендуется для этого применять металлические щетки, металлические предметы из-за возможности нанесения царапин, которые могут затруднить расшифровку индикаторных рисунков.

При выполнении контроля объектов с темной поверхностью (например при использовании черного магнитного порошка) с целью увеличения контраста на нее наносят из краскораспылителя слой белой нитрокраски (применяемой для цветной дефектоскопии) или белой нитрокраски толщиной 5–10 мкм.

При такой толщине поверхность объекта контроля «просвечивается» через специально нанесенный слой краски.

После операции по подготовке контролируемого объекта к контролю следует операция по проведению намагничивания.

#### *Виды и способы намагничивания*

Намагничивание объекта контроля – это наиболее ответственная технологическая операция МНК. От правильности выбора и способа намагничивания зависит достоверность получаемых результатов.

Способы намагничивания определяются многими факторами:

- направлением и глубиной ожидаемых дефектов;
- видом дефектов и их происхождением;
- магнитными свойствами материала;
- размером и формой контролируемых объектов.

Способы намагничивания контролируемых объектов весьма разнообразны, они определяются конфигурацией и размером деталей, магнитной природой материала и характером ожидаемых дефектов, а также задачами контроля.

При контроле объектов при помощи МНК применяют три вида намагничивания:

- продольное (полюсное);
- циркулярное;
- комбинированное.

При продольном (полюсном) намагничивании контролируемый объект образует разомкнутую магнитную цепь с полюсами по краям в направлении намагничивающего поля.

В тех случаях, когда в контролируемых объектах требуется выявлять поперечные дефекты, используется продольное намагничивание. Такое намагничивание осуществляется либо в поле электромагнита, либо в поле катушек с установкой изделия вдоль намагничивающего поля (между полюсами электромагнита) и соосно в катушках (рис. 46).

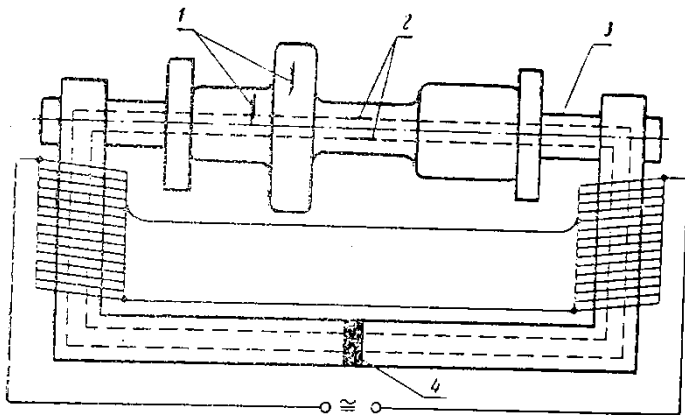


Рис. 46. Намагничивание контролируемого объекта в поле электромагнита:  
1 – поперечные трещины; 2 – продольные трещины; 3 – электрод;  
4 – изоляция

При данном контроле важное значение имеет уровень намагничивания. Наибольшая эффективность выявления дефектов

наступает, когда намагниченность детали достигает на кривой намагничивания точки, после которой следует медленное возрастание намагниченности, с ростом поля иначе, когда намагничивающее поле оказывается равным полю максимальной магнитной проницаемости материала.

Так как в случае продольного намагничивания сравнительно короткого и толстого контролируемого объекта в нем действует размагничивающее поле, то наиболее важной при определении оптимального намагничивающего поля является не проницаемость материала, а эффективная магнитная проницаемость. Она определяется отношением магнитной индукции  $B$  к намагничивающему полю  $H$ , действующему в отсутствии объекта контроля. Форма и размер контролируемого объекта влияют на эффективную проницаемость в наибольшей степени.

Продольное намагничивание может производиться различными способами: постоянным, переменным или импульсным током.

Постоянным током намагничиваются немассивные детали, имеющие сравнительно простую геометрическую форму (подкосы, цапфы и прочее).

Переменным током в соленоиде намагничиваются немассивные детали сложной конфигурации (резьбы, шлицевые соединения).

Импульсное намагничивание осуществляют обычно с помощью гибкого кабеля, наматываемого на массивную деталь.

При намагничивании постоянным током и контроле при остаточной намагниченности проверяют детали с отношением длины к ширине (диаметру) от 25 и более. При намагничивании переменным током это отношение может составлять 3...5 и более.

Основным затруднением, осложняющим продольное намагничивание, является образование свободных магнитных полюсов на концах объекта контроля. Магнитные полюса, порождая внутри материала контролируемого объекта обратное неоднородное (из-за отталкивания одноименных зарядов) размагничивающее поле, нарушают направленность продольного намагничивания и приводят тем самым к так называемым «неконтролируемым концам». Одним из средств борьбы может служить искусственное удлинение контролируемого объекта путем присоединения к нему с обеих сторон дополнительных «приставок» соответствующего профиля.

При использовании продольного намагничивания надо учитывать еще и другие важные особенности. Из-за того что магнитное поле

всегда стремится пройти через магнитный материал, то при намагничивании объекта контроля переменного сечения в ней возникает неоднородное намагничивание. При более или менее резком переходе от малого сечения к большему магнитная индукция ослабляется пропорционально квадрату диаметра. Так, если меньшее сечение доведено до магнитного насыщения, то в соседнем сечении с диаметром, например, в 3 раза большем, намагниченность будет составлять всего 1/9 насыщения. Поэтому вряд ли можно ожидать здесь выявления дефекта. Гораздо лучшие результаты получаются при намагничивании переменным полем, при котором намагничение с увеличением диаметра уменьшается приблизительно линейно.

Циркулярное намагничивание производится магнитным полем, создаваемым током. Когда ток проходит через проводник, то внутри и вокруг него возникает циркулярное магнитное поле, которое, проходя по ферромагнитному материалу, намагничивает его циркулярно, не вызывая никаких размагничивающих полей, приводящих к ослаблению основного намагничивающего поля, и не создающих на поверхности цилиндрического проводника рассеянных магнитных полей, если не считать поля рассеяния дефекта.

Распределение магнитного поля внутри неферромагнитного проводника, когда поле возбуждается пропусканием по нему постоянного тока, отличается от распределения внешнего поля тем, что поле внутри проводника увеличивается линейно от нуля в центре проводника до максимума на поверхности. За пределами поверхности оно с увеличением расстояния убывает по гиперболической кривой.

В случае ферромагнитного проводника поле в центре будет также нулевым, но поле на поверхности будет в  $\mu$  раз больше, т. е. будет  $\mu \cdot H$ , где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала, тогда как за пределами поверхности напряженность поля будет падать с того же значения поля, как и при неферромагнитном проводнике, и с увеличением расстояния будет падать по такой же гиперболической кривой.

Циркулярное намагничивание, осуществляемое пропусканием тока через изделие, является эффективным поперечным намагничиванием, обеспечивающим уверенное выявление продольных и косолежащих дефектов.

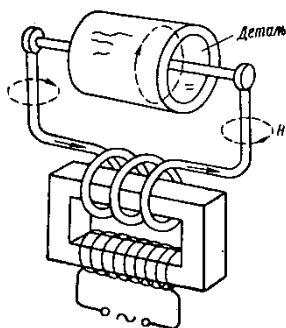


Его также применяют и при контроле неподвижных объектов и конструкций с намагничиванием по участкам с помощью ручных электрических контактов, выбирая при этом соответствующее направление тока.

Недостаток данного способа намагничивания заключается в том, что при нем могут иногда образовываться вредные для высококачественных объектов контроля ожоги.

Циркулярное намагничивание можно применить и в тех случаях, когда нужно провести контроль по внутренней поверхности полых или кольцевых объектов. Для этого удобно воспользоваться пропусканием тока по токопроводящему стержню (медному, латунному или алюминиевому) с насаженным на него соосно полым изделием (рис. 47). В этом случае необходимое намагничивание достигается внешним магнитным полем тока стержня.

Пропускание тока через вспомогательный стержень представляет собой бесконтактный способ циркулярного намагничивания, поэтому не приходится опасаться повреждения изделия от ожога и от искры при включении тока.



Этот способ можно применять и при большом внутреннем диаметре объекта контроля.

Рис. 47. Циркулярное намагничивание полых объектов контроля, осуществляемое пропусканием тока через прутки

Комбинированное намагничивание получает широкое распространение, так как только при этом способе намагничивания создаются условия для уверенного выявления дефектов любого направления за один прием намагничивания.

Комбинированное намагничивание представляет собой как бы соединение продольного намагничивания, осуществляемого полем электромагнита или катушки, с поперечно-циркулярным намагничиванием, достигаемым путем или непосредственного пропускания переменного тока через контролируемый объект или пропускания его через вспомогательный стержень (рис. 48), если изделие будет полое.

Для устранения возможности замыкания вспомогательного тока через магнитопроводника в магнитопроводе. Такое намагничивание приводит к тому, что в каждой точке поверхности контролируемого объекта действует результирующий вектор спирального магнитного поля с поперечной и продольной составляющими, так что он периодически пересекает трещину любого направления.

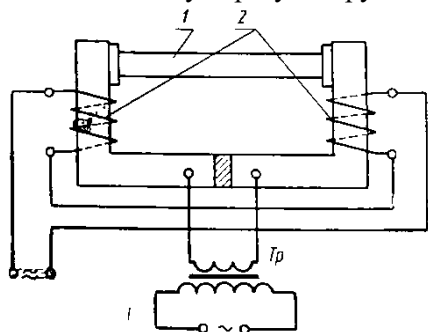


Рис. 48. Комбинированное намагничивание в 2-х скрещенных магнитных полях:

1 – деталь; 2 – электромагнит

При уменьшении угла между результирующим вектором и продольным направлением трещины он начинает действовать в плоскости трещины, и эффект выявления ослабляется. Для уверенного выявления трещин необходимо, чтобы результирующий вектор был под углом не менее  $45^{\circ}$ . Поэтому целесообразнее применять для продольного и поперечного намагничивания два переменных тока с необходимым сдвигом фаз. В этих условиях при токе с частотой 50 Гц результирующий вектор 100 раз в секунду проходит перпендикулярно к любому направлению трещин.

#### *Способы регистрации дефектов при магнитопорошковом контроле*

Применяются различные способы регистрации дефектов. Выбор обусловлен следующими факторами:

- геометрией контролируемого изделия;
- необходимой чувствительностью контроля;
- заданной разрешающей способностью контроля;
- его производительностью.

Способ регистрации дефектов при помощи порошка состоит в нанесении порошка ферромагнитного материала на намагниченный контролируемый объект и в регистрации скоплений этого порошка вблизи дефектов. Над дефектом образуются локальные магнитные поля рассеяния. На попавшие в поле частицы действуют силы,

стремящиеся затянуть их в места наибольших концентраций магнитных силовых линий.

Частицы накапливаются вблизи дефекта и одновременно намагничиваются полем рассеяния дефекта. Притягиваясь друг к другу, эти частицы образуют цепочечные структуры, ориентированные по магнитным силовым линиям поля дефекта.

Происходит накопление частиц осевшего порошка в виде полосок (валиков, жилок, шнуров) над дефектом.

Применяются два способа нанесения порошка на объект контроля – «сухой» и «мокрый».

«Сухой» способ состоит в нанесении на контролируемый объект высокодисперсного порошка с размерами частиц 0,1–10 мкм в воздушной взвеси. Этот способ применяется для обнаружения подповерхностных дефектов, а также дефектов под слоем немагнитного покрытия толщиной до 200 мкм.

Другой способ нанесения сухого порошка на изделие применяется для грубо дисперсионных порошков с размером частиц от 0,05 до 2 мм. В этом случае порошок наносится с помощью пульверизатора, резиновой груши или качающегося сита. Этот способ применяется для обнаружения относительно крупных поверхностных и подповерхностных дефектов, а также для контроля объектов с грубо обработанной поверхностью.

«Мокрый» способ нанесения магнитного порошка на поверхность намагниченного контролируемого объекта осуществляют путем полива объекта суспензией магнитного порошка или путем погружения объекта в ванну, наполненную суспензией. Магнитная суспензия должна стечь с поверхности – контролируемый объект располагают под наклоном.

Также возможен контроль без извлечения объекта контроля из суспензии для осмотра. Такой способ рекомендуется для обнаружения шлифовочных трещин под слоем хрома толщиной до 0,2 мм.

Результаты контроля оценивают по наличию на объекте контроля валика магнитного порошка, видимого глазом или через лупу. Четкий, нерасплывшийся валик свидетельствует о дефекте, выходящем на поверхность, расплывшийся валик – о подповерхностном дефекте. Длина валика равна протяженности дефекта плюс-минус погрешность, равная ширине валика.

Для определения дефектов под толстым слоем немагнитного покрытия, для контроля участков на контролируемых объектах с ограниченными подходами, для выявления дефектов в шаровых соединениях без разборки и дефектов на внутренних поверхностях глубоких отверстий в качестве эмульсий применяют каучуковую смесь с ферромагнитным порошком. Эту смесь наносят на контролируемый объект путем полива, а дефекты обнаруживают по распределению магнитного порошка в отпечатке (реплике) – в затвердевшей каучуковой смеси.

Осаждение магнитного порошка не всегда указывает на наличие дефекта. Образование поля рассеяния мнимого дефекта может происходить, например, при структурной неоднородности, по границе раздела участков с резко отличающимися структурами. Осаждение порошка при этом неплотное, в виде широкой полосы с размытыми границами. При одном и том же способе намагничивания осаждение порошка происходит на всех объектах контроля и в одних и тех же местах.

Возможно также осаждение порошка на следе соприкосновения намагниченной детали с каким-либо острым ферромагнитным предметом. Для расшифровки такого дефекта контролируемый объект необходимо повторно намагнитить.

После повторного намагничивания осаждения магнитного порошка в месте соприкосновения объекта контроля с ферромагнитным предметом не будет. Чтобы отличить дефекты, выходящие на поверхность, от ложных, в качестве контрольных можно применять капиллярные методы контроля.

#### *Магнитные индикаторы дефектов*

Индикаторами дефектов в магнитопорошковой дефектоскопии служат магнитные порошки (Fe-порошки). От их качества зависят результаты контроля. Используются порошки с высокой магнитной проницаемостью и индукцией. Для контроля деталей применяются сухие магнитные порошки, и магнитные суспензии с 5–15 % концентрацией Fe-порошка.

Магнитная суспензия представляет собой взвесь магнитного порошка в жидкой среде (в открытых сосудах или аэрозольных баллонах). В качестве среды могут быть использованы вода, масло (типа МС, МК), керосин, смесь масла с керосином и т.д.

Суспензия должна удовлетворять следующим требованиям: иметь высокие антикоагуляционные свойства; обеспечивать

смачиваемость поверхности ОК, обладать антикоррозионными свойствами; не замерзать при отрицательных температурах окружающей среды (до  $-5^{\circ}\text{C}$ ).

Магнитный порошок наносят на контролируемую поверхность детали путем аэрозольного напыления, полива или погружения детали в магнитную суспензию. По цвету порошок должен контрастировать с контролируемой поверхностью. Если поверхность контролируемого объекта имеет одинаковый цвет с порошком, допускается предварительное нанесение на поверхность объекта контроля контрастной краски (например, тонкого слоя белой нитроэмали).

#### *Размагничивание объекта контроля*

Размагничивать контролируемый объект после проведения контроля необходимо, так как остаточная намагниченность может вызвать нежелательные последствия (поверхности плохо размагниченных вращающихся и соприкасающихся при работе объектов притягивают ферромагнитные продукты износа, что вызывает ускоренный выход объектов из строя).

Любое размагничивание сводится к периодическому изменению величины и направления магнитного поля, в котором находится объект контроля, с постепенным уменьшением этого поля до нуля. На рис. 49 представлен график изменения индукции в контролируемом объекте при размагничивании.

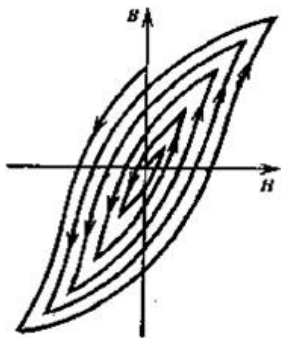


Рис. 49. График изменения индукции в детали при размагничивании

Когда напряженность размагничивающего поля достигнет нулевого значения, остаточная индукция в объекте контроля будет также близка к нулю.

Применяются следующие способы размагничивания:

- медленное протаскивание намагниченного объекта контроля через отверстие катушки, питаемой переменным током частоты 50 Гц. Объект контроля удаляют на расстояние не менее 1 м от катушки. В этом случае переменное поле, обладая ограниченной глубиной

проникновения, эффективно размагничивает только поверхностный слой контролируемого объекта;

- пропускание переменного тока, равного намагничивающему, непосредственно через деталь с постепенным уменьшением его до нуля;

- коммутацию постоянного тока в соленоиде или в обмотках электромагнита с постепенным снижением тока до нуля;

- использование электромагнита, питаемого переменным током, постепенно снижаемым до нуля.

Лучший результат достигается с использованием тех же средств, которые применялись при намагничивании.

Для контроля размагничивания можно использовать притяжение малых магнитных масс: подводят нижний конец цепочки из 6–10 канцелярских скрепок к объекту контроля и по отклонению цепочки от вертикального положения (вследствие ее притяжения к контролируемому объекту) судят о размагниченности объекта.

## **7. ТОКОВИХРЕВОЙ КОНТРОЛЬ**

### **7.1. Общие сведения**

Токовихревой контроль (ТВК) основан на анализе изменения электромагнитного поля вихревых токов под действием тех или иных неоднородностей объекта контроля. Данный метод контроля может быть использован для контроля объектов из любых металлов на основании того, что вихревые токи могут возбуждаться в электропроводящих материалах.

В основном данный метод контроля используется для выявления поверхностных и подповерхностных (в слое до 1 мм) дефектов сплошности в объектах различной формы из немагнитных сплавов. Иногда ТВК применяют для определения марки материала или изменений структуры некоторых сплавов.

ТВК обладает рядом преимуществ, которые проявляются при контроле объектов с защитными покрытиями, небольших по площади участков, объектов, расположенных в труднодоступных местах конструкции, при поиске малораскрытых трещин и т. д.

Отметим ряд специфических условий для токовихревого контроля при поиске несплошности материала:

- не должно быть значительных изменений формы поверхности в пределах зоны контроля объекта (например, сложно контролировать

галтельные переходы вдоль замка рабочих лопаток роторов компрессоров и турбин ГТД);

- не должно быть неоднородности свойств материала по всей зоне контроля объекта (например, практически невозможно эффективно контролировать сварные швы стальных узлов, лопатки компрессора ГТД из ферромагнитного материала, на которых есть прижоги, участки наклепа и т. д.);

- не должно быть существенных изменений толщины контролируемого объекта по всей зоне контроля, если толщина соизмерима с глубиной проникновения вихревых токов.

## 7.2. Физические основы ТВК

ТВК-контроль основан на взаимодействии внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, которые наводятся в контролируемом объекте (внешним) полем.

Для более подробного понятия сути процессов взаимодействия полей рассмотрим природу электромагнитного поля.

*Электромагнитное поле*

Оно является совокупностью неразрывно связанных друг с другом в пространстве магнитных и электрических полей. Согласно закону электромагнитной индукции, всякое изменение в пространстве магнитного поля сопровождается появлением электрического поля, которое создает магнитное поле.

Вектор магнитной индукции  $B$  – величина, характеризующая направление и интенсивность магнитного поля в любой точке среды. Вычисляется по формуле:

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

где  $\mu$  – магнитная проницаемость среды;  $H$  – напряженность магнитного поля.

Напряженность магнитного поля зависит от силы тока, создающего это поле.

Число линий магнитной индукции, пронизывающих некоторую поверхность  $S$ , – это магнитный поток  $\Phi$ :

$$\Phi = B \cdot S.$$

Электромагнитное поле возникает в среде, окружающей электрическую цепь, и в самой цепи при наличии в ней тока. Магнитные и электрические поля распределяются вдоль цепи

неравномерно – электрическое поле сосредоточено между пластинами конденсатора, магнитное поле имеет наибольшую концентрацию в среде, окружающей катушку индуктивности.

Чем больше число витков катушки и чем больше сила тока, протекающего по ее обмотке, тем выше напряженность поля  $H$  и тем больший магнитный поток  $\Phi$  пронизывает катушку.

Индуктивность  $L$  (коэффициент самоиндукции катушки) – коэффициент, который связывает магнитный поток  $\Phi$  и силу тока  $I$ , протекающего по обмотке катушки:

$$L = \Phi / I.$$

При всяком изменении магнитного потока, пронизывающего контур проводника, в последнем возникает электродвижущая сила (ЭДС) индукции. Это и есть закон электромагнитной индукции.

ЭДС самоиндукции – ЭДС, наведенная в катушке и обусловленная изменением магнитного потока, созданного протекающим в катушке током.

ЭДС самоиндукции катушки пропорциональна угловой частоте ( $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота тока), индуктивности катушки  $L$  и силе тока  $I$ :

$$E = \omega \cdot L \cdot I.$$

Общее сопротивление катушки, по обмотке которой протекает переменный ток, складывается из активного и индуктивного сопротивлений.

Активное сопротивление  $R$  катушки – это сопротивление, в котором происходит необратимый процесс превращения электрической энергии в другой вид энергии (например, тепловую).

Индуктивное сопротивление  $X_L$  катушки – это сопротивление, обусловленное ЭДС самоиндукции катушки:

$$X_L = \omega \cdot i \cdot L,$$

где  $i$  – мнимая единица.

Комплексное сопротивление катушки – это результирующее сопротивление катушки, по которой протекает переменный ток:

$$Z = R + X_L.$$

При пересечении металлических тел переменным магнитным полем, возникающим от катушки индуктивности, в них, согласно закону электромагнитной индукции, появляется ЭДС и протекают вихревые токи (токи Фуко).



### Возбуждение и распределение вихревых токов в объекте контроля

Рассмотрим, как возбуждаются вихревые токи в немагнитном материале накладным цилиндрическим датчиком без сердечника (рис. 50).

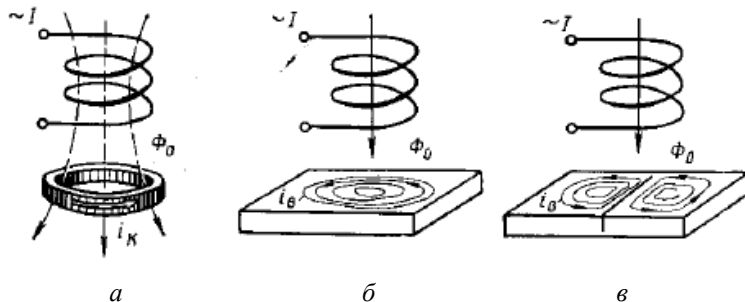


Рис. 50. Возбуждение вихревых токов:

*a* – в кольце; *б* – в сплошном материале; *в* – в материале с трещиной

Переменный ток  $I$ , проходящий по обмотке датчика, образует в пространстве вокруг него переменное магнитное поле, значение потока для которого равно  $\Phi_0$ .

Поле у датчика будем изображать одной стрелкой (рис. 50, б, в). При помещении в это поле металлического кольца (рис. 50, а) в нем будет наведена ЭДС и пойдет переменный ток  $i_K$  (в соответствии с законом электромагнитной индукции).

Такой же эффект будет при помещении в поле датчика части металлического объекта: непосредственно под ним внутри объекта во множестве замкнутых контуров, соосных с датчиком, возбуждятся ЭДС и пойдут токи  $i_B$  (рис. 50, б).

Вихревыми, называются токи, возбуждаемые в металлических телах переменным во времени магнитным полем.

Траектории вихревых токов, наведенных полем цилиндрического датчика, если в этом месте детали нет несплошностей, представляют собой замкнутые окружности.

В том случае, когда в объекте контроля под датчиком окажется трещина, то вихревые токи будут обтекать ее с обеих сторон, а их траектории в этом случае также остаются замкнутыми. При наличии большой трещины произойдет разделение контуров вихревых токов на две части (рис. 50, в).

Вихревые токи исчезают на прежнем месте в том случае, когда происходит смещение датчика на другой участок объекта контроля, и появляются они под датчиком на новом месте.

Метод вихревых токов – метод локального контроля, именно поэтому датчик необходимо помещать в каждую точку проверяемой зоны контролируемого объекта.

Вихревые токи возбуждаются независимо от того, прижат ли датчик к поверхности контролируемого объекта или между ними есть слой защитного покрытия, воздушный зазор или смазка.

Распределение вихревых токов показано на рис. 51, а.

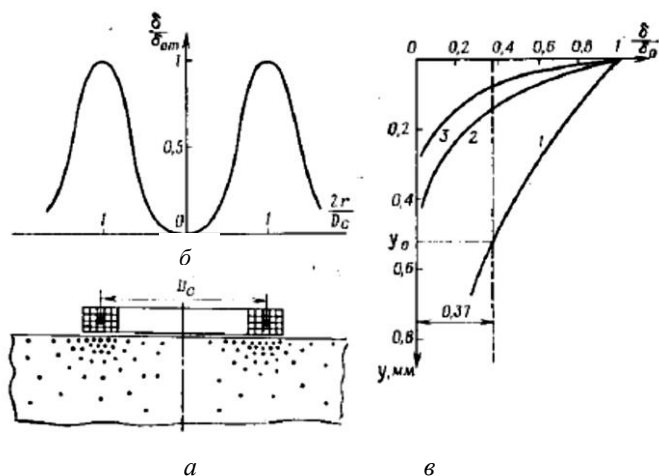


Рис. 51. Распределение вихревых токов:

- а – следы траекторий вихревых токов на секущей плоскости;
- б – зависимость плотности  $\delta/\delta_{от}$  от расстояния до оси датчика;
- в – зависимость плотности  $\delta/\delta_o$  от расстояния до поверхности

Точками изображены следы траекторий вихревых токов на секущей плоскости, проходящей через ось датчика. Их распределение в контролируемом объекте неравномерное как по поверхности, так и по глубине.

Зависимость относительной плотности вихревого тока  $\delta/\delta_{от}$  от относительного расстояния до оси датчика  $2r/D_c$  показана на рис. 51, б, где  $\delta_{от}$  – максимальная плотность вихревого тока;  $r$  – координата точки наблюдения;  $D_c$  – средний диаметр датчика.

Эквивалентный контур вихревых токов – контур, в котором протекают вихревые токи максимальной плотности, диаметр которого равен приблизительно среднему диаметру плоского датчика, прижатого к объекту контроля.

Чем выше удельная электропроводность объекта контроля или частота возбуждения, тем больше значение максимума  $\delta_{от}$ . При отводе датчика от объекта контроля значение плотности  $\delta$  в каждой точке уменьшается, а диаметр эквивалентного контура вихревого тока растёт.

При  $2r/D_c = 0$ , а также на некотором удалении от датчика плотность вихревых токов будет равна нулю. Дефект не будет обнаружен, если он расположен за кругом, в пределах которого существуют вихревые токи.

Особенностью протекания вихревых токов является поверхностный эффект. Он заключается в стремлении вихревых токов концентрироваться в поверхностных слоях объекта контроля, расположенных ближе всего к датчику.

Вихревые токи (и возбуждающее их поле) по мере углубления в контролируемый объект ослабевают.

На рис. 51, в приведены графики, характеризующие ослабление вихревых токов:

- позиция 1 (рис. 51) – в жаропрочном материале;
- позиция 2 (рис. 51) – в магниевом сплаве;
- позиция 3 (рис. 51) – в алюминиевом сплаве.

Для количественной оценки ослабления вихревых токов в различных металлах и при различной частоте введено понятие «условная глубина проникновения вихревых токов» –  $y_0$  (расстояние от поверхности, на котором плотность вихревых токов в  $e$  раз меньше, чем на поверхности, что соответствует уменьшению ее до  $0,37\delta_0$ ).

Глубина проникновения вычисляется по формуле:

$$y_0 = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}}$$

где  $f$  – частота;  $\sigma$  – удельная электропроводность материала объекта контроля;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала контролируемого объекта.

В случае, если глубина поверхностной и подповерхностной несплошности близка к глубине проникновения  $y_0$  или больше нее, то такая несплошность (рис. 52, а) надежно обнаруживается

методом ВТ. Если же глубина несплошности значительно меньше  $y_0$  (рис. 52, б), то она может быть не выявлена. Несплошность, которая расположена глубже слоя, в котором протекают вихревые токи (рис. 52, в), не выявляется.

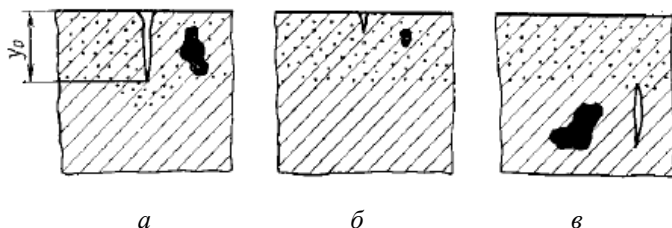


Рис. 52. Положение несплошности различных размеров относительно слоя глубиной  $y_0$ : а – выявляемые несплошности; б – несплошности могут быть пропущены; в – несплошности не могут быть выявлены

#### Формирование сигнала датчика

Вихревые токи образуют магнитное поле (рис. 53) над проверяемым участком объекта контроля подобно тому, как ток, протекающий по обмотке датчика, создает в пространстве магнитное поле.

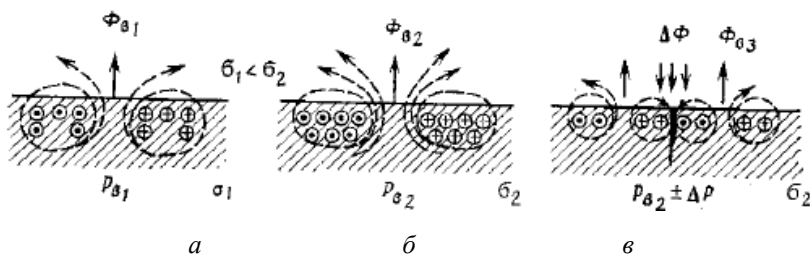


Рис. 53. Картины магнитного поля вихревых токов у поверхности контролируемого объекта: а, б – контролируемый объект без трещины; в – контролируемый объект с трещиной

Значение потока вихревых токов  $\Phi_v$  зависит от магнитной проницаемости, электропроводности и сплошности проверяемого материала. Он меньше в случае, если меньше электропроводность:  $\Phi_{v1} < \Phi_{v2}$  (рис. 53, а, б).

Нормальная составляющая магнитного потока вихревых токов в любой момент направлена навстречу нормальной составляющей возбуждающего потока  $\Phi_0$  датчика.

При отсутствии несплошности в контролируемом объекте под датчиком пространственная картина магнитного поля вихревых токов имеет осевую симметрию.

Если под датчиком находится трещина, то осевая симметрия нарушается, так как меняются траектории вихревых токов (рис. 53, в). Часть вихревых токов, которые обтекают трещину с двух сторон в противоположных направлениях, создает над ней дополнительное поле дефекта, нормальная составляющая которого направлена так же, как и нормальная составляющая возбуждающего поля. Поток поля дефекта обозначен  $\Delta\Phi$ .

Магнитный поток вихревых токов формирует в датчике сигнал. Дополнительный поток  $\Delta\Phi$  вызывает приращение этого сигнала при наличии дефекта. Поток вихревого тока и его приращения тем больше, чем больше возбуждающий поток  $\Phi_0$  и чем ближе к объекту контроля расположен датчик.

При протекании вихревых токов наблюдается превращение электрической энергии в теплоту – это превращение происходит на электрическом сопротивлении, которое вихревые токи испытывают со стороны материала контролируемого объекта.

Энергия, превращающаяся в теплоту за единицу времени (потери мощности), обозначается, как  $P_B$ . Если поток вихревого тока  $\Phi_B$  с ростом электропроводности материала (в пределах  $0 - \infty$ ) растет, то потери мощности на вихревые токи  $P_B$  вначале увеличиваются, а затем падают до нуля (рис. 54).

Энергия, которая превращается внутри объекта контроля в теплоту, поступает из датчика, который можно рассматривать как генератор электрической энергии, и поэтому потери мощности на вихревых токах приводят к изменению параметров (активного сопротивления) датчика и являются величиной, которая вместе с магнитным потоком вихревых токов формирует сигнал датчика.

Потери мощности на вихревых токах тем больше, чем больше возбуждающий поток  $\Phi_0$  и чем ближе к детали расположен датчик.

При большой мощности катушки индуктивности происходит разогревание поверхностных слоев объекта контроля вихревыми токами до высокой температуры.

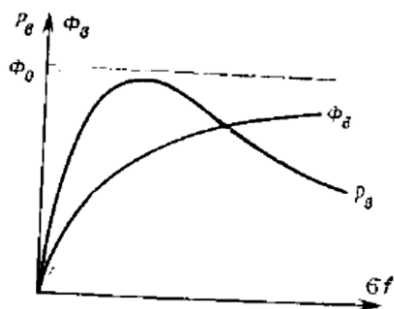


Рис. 54. Зависимость магнитного потока вихревых токов и потерь мощности на вихревые токи от электропроводности материала и частоты

Далее рассмотрим, как величины  $\Phi_B$  и  $P_B$  трансформируются в сигнал параметрического датчика – активное и индуктивное сопротивление.

В режиме холостого хода активное сопротивление датчика  $R_0$  (рис. 55, з) определяется через потери мощности в самом датчике  $P_0$ , а его индуктивность  $L_0$  – через возбуждающий магнитный поток  $\Phi_0$ :

$$R_0 = P_0/I^2; L_0 = \Phi_0/I.$$

В токовихревых дефектоскопах сила тока в обмотке  $I = \text{const}$ , так как датчики подключают к электронному генератору с большим внутренним сопротивлением.

Изменения сопротивления  $R$  или индуктивности  $L$  датчика вызовут пропорциональные изменения потерь мощности и потока, и наоборот, изменения  $P$  и  $\Phi$  вызовут пропорциональные преобразования  $R$  и  $L$ .

Полное сопротивление датчика принято изображать на комплексной плоскости, откладывая по мнимой оси индуктивное сопротивление  $\omega L$ , а по вещественной оси – активное сопротивление  $R$  (рис. 55, з).

Точка  $\sigma = 0$  с координатами  $R_0$  и  $\omega L_0$  определяет полное сопротивление датчика  $Z_0$  в режиме холостого хода.

Далее рассмотрим то, что происходит с величинами  $\omega L$  и  $R$  при возбуждении вихревых токов (рис. 55, а, б, в).

Через витки обмотки датчика, помещенного на контролируемый объект, у которого электропроводность материала равна  $\sigma_1$  (рис. 55, а), проходят два встречно направленных потока – возбуждающий  $\Phi_0$  и поток вихревого тока  $\Phi_{в1}$ .

Результирующий поток равен их разности:  $\Phi_1 = \Phi_0 - \Phi_{B1}$ . В этом случае индуктивность  $L_1$  датчика равна  $\frac{\Phi_1}{I}$  и будет меньше, чем его индуктивность  $L_0$  в режиме холостого хода:

$$L_1 = \frac{\Phi_1}{I} = \frac{\Phi_0 - \Phi_{B1}}{I} = L_0 - \frac{\Phi_{B1}}{I}.$$

Величина  $\frac{\Phi_{B1}}{I}$  обусловлена вихревыми токами. Она появляется, когда датчик установлен на объект контроля и как бы им вносится, поэтому называется вносимой индуктивностью  $L_{вн}$ .

Таким образом, в случае, рассматриваемом на рис. 55, а:

$$L_1 = L_0 - L_{вн1}.$$

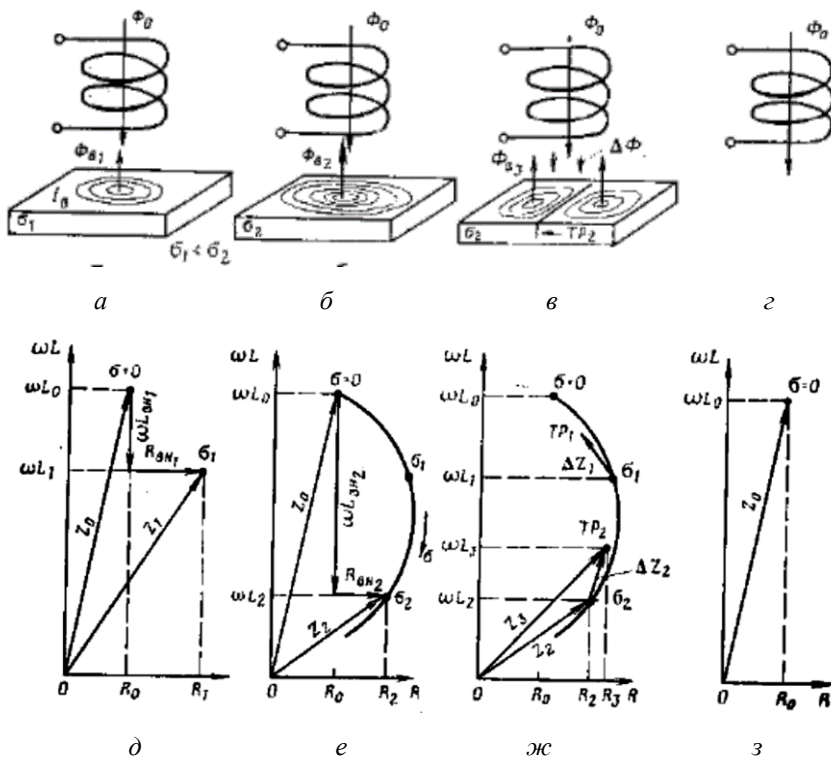


Рис. 55. Формирование сигнала датчика и его изображение на комплексной плоскости

Энергия, превращающаяся в контролируемом объекте в теплоту, поступает из датчика.

Поэтому потери мощности в датчике состоят из потерь в обмотке (и сердечнике) датчика и потерь вихревых токов в объекте контроля:

$$P_l = P_0 + P_{\epsilon l}.$$

В этом случае активное сопротивление  $R$  датчика равно  $\frac{P_1}{I^2}$  и будет больше, чем в режиме холостого хода:

$$R_l = \frac{P_0}{I^2} + \frac{P_{\epsilon l}}{I^2} = R_0 + \frac{P_{\epsilon l}}{I^2}.$$

Величина  $\frac{P_{\epsilon l}}{I^2}$  обусловлена объектом контроля и называется вносимым активным сопротивлением  $R_{\text{вн}}$ .

Таким образом, в случае, который рассматривается на рис. 55, а:

$$R_l = R_0 + R_{\text{вн}1}.$$

При размещении датчика на объекте контроля его индуктивное сопротивление уменьшается на величину  $\omega L_{\text{вн}1}$ , а активное сопротивление увеличивается на величину  $R_{\text{вн}1}$ , комплексное сопротивление  $Z$  изменяется на величину:

$$Z_{\text{вн}1} = R_{\text{вн}1} - j\omega L_{\text{вн}1}.$$

Эта величина и является сигналом датчика.

Вычтя на комплексной плоскости (рис. 55, д) из индуктивного сопротивления  $\omega L_0$  датчика в режиме холостого хода вносимое индуктивное сопротивление  $\omega L_{\text{вн}1}$  и добавив к активному сопротивлению  $R_0$  вносимое активное сопротивление  $R_{\text{вн}1}$ , получаем точку  $\sigma_1$  на плоскости, которая характеризует комплексное сопротивление датчика  $Z_l$ , помещенного на металл с электропроводностью  $\sigma_1$ .

При размещении датчика над металлом с большей электропроводностью  $\sigma_2$  (рис. 55, б) поток вихревых токов увеличится по сравнению с предыдущим случаем и будет равен  $\Phi_{\text{в}2}$ , а потери мощности на вихревые токи могут увеличиться или уменьшиться (рис. 54) до значения  $P_{\text{в}2}$ .

Соответственно этому изменятся вносимая индуктивность и вносимое активное сопротивление, они будут равны  $L_{\text{вн}2}$  и  $R_{\text{вн}2}$ . Для определения комплексного сопротивления датчика  $Z_2$  необходимо найти координаты точки  $\sigma_2$  на плоскости (рис. 55, е):

$$\omega L_0 - \omega L_{\text{вн}2} \text{ и } R_0 + R_{\text{вн}2}.$$



Переставляя датчик на металлы с возрастающей электропроводностью, получим на комплексной плоскости ряд точек, которые определяют полное сопротивление датчика  $Z$ , а также полное вносимое сопротивление (сигнал датчика), соответствующее этим значениям  $\sigma$ . Соединив все точки  $\sigma$  линией, получаем график зависимости  $Z$  датчика или  $Z_{вн}$  от электропроводности. Такая же зависимость  $Z$  датчика и  $Z_{вн}$  получается при  $\sigma = \text{const}$ , но при изменении частоты возбуждения вихревого тока от 0 до  $\infty$ .

Графики  $Z$  ( $\sigma$ ,  $f$  и другие), которые показывают зависимость сигнала датчика на комплексной плоскости от свойств материала контролируемого объекта, расстояния до датчика, формы объекта контроля, размеров дефекта и др., называют годографами.

Что же представляет собой сигнал датчика при наличии под ним дефекта?

Пусть в детали с электропроводностью материала  $\sigma_2$  под датчиком имеется трещина (рис. 55, в). Это приводит по сравнению со случаем, который изображен на рис. 55, б, к появлению дополнительного магнитного потока  $+\Delta\Phi$ , а также к увеличению или к уменьшению потерь мощности на вихревых токах на  $\pm\Delta P$  (рис. 53, в).

Результирующие поток и потери мощности датчика определяются выражениями:

$$\Phi_3 = \Phi_0 - \Phi_{вн2} + \Delta\Phi;$$

$$P_3 = P_o + P_{e1} \pm \Delta P.$$

Разделим первое из них на  $I$ , второе на  $I^2$ , и получим:

$$L_3 = L_0 - L_{вн2} + \Delta L;$$

$$R_3 = R_o + R_{вн2} \pm \Delta R.$$

При наличии трещины индуктивность датчика увеличивается, вносимая индуктивность уменьшается, активное сопротивление датчика и вносимое активное сопротивление могут увеличиться, уменьшиться или не измениться – все это зависит от того, при каких значениях произведения  $\sigma f$  выполняется контроль.

На рис. 55, ж приращение сигнала, вызванное трещиной, изображено вектором  $\Delta Z_2$ .

Вектор  $Z_3$ , соединяющий начало координат с точкой  $TR_2$ , изображает полное сопротивление датчика, установленного на объект контроля с трещиной.

На рис. 55, ж показан также сигнал (вектор  $\Delta Z_1$ ) датчика, вызванный трещиной в материале с электропроводностью  $\sigma_1$ .

*Классификация и принцип действия вихретоковых преобразователей*

Классификация вихретоковых преобразователей представлена на рис. 56.



Рис. 56.  
Классификация  
вихретоковых  
преобразователей

По принципу съема информации делят на абсолютные и дифференциальные.

Абсолютными (рис. 57) называют вихретоковые преобразователи, выходной сигнал которых определяется абсолютными значениями параметров контролируемого объекта в зоне контроля.

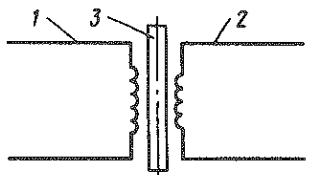


Рис. 57. Абсолютный трансформаторный вихретоковый преобразователь:  
1, 2 – возбуждающая и измерительная обмотки; 3 – контролируемый объект

Дифференциальный – это совокупность двух абсолютных вихретоковых преобразователей, обмотки которых соединены так, что выходной сигнал определяется разностью параметров соответствующих зон контроля.

По типу преобразования параметров контролируемого объекта в выходной сигнал вихретоковые преобразователи подразделяют на параметрические и трансформаторные.

Главное преимущество параметрических вихретоковых преобразователей заключается в их простоте, а недостатком является зависимость выходного сигнала от температурных условий (это слабее выражено в трансформаторных преобразователях).

По принципу съема информации вихретоковые преобразователи делят на абсолютные и дифференциальные.

В зависимости от расположения вихретокового преобразователя по отношению к контролируемому объекту их классифицируют на проходные, накладные и комбинированные.

Конструктивной особенностью проходных наружных преобразователей является то, что их катушки полностью охватывают контролируемый объект. Катушки внутренних вихретоковых преобразователей вводят внутрь объекта контроля.

При ТВК широко применяют вихретоковые преобразователи накладного типа. Их оси располагают перпендикулярно к поверхности контролируемого объекта, что позволяет контролировать объекты сложной конфигурации при высокой достоверности контроля.

Накладной вихретоковый преобразователь имеет одну или несколько обмоток. Их катушки могут быть круглыми коаксиальными (рис. 58, а), прямоугольными (рис. 58, б), прямоугольными крестообразными (рис. 58, в), с взаимно перпендикулярными осями (рис. 58, г).

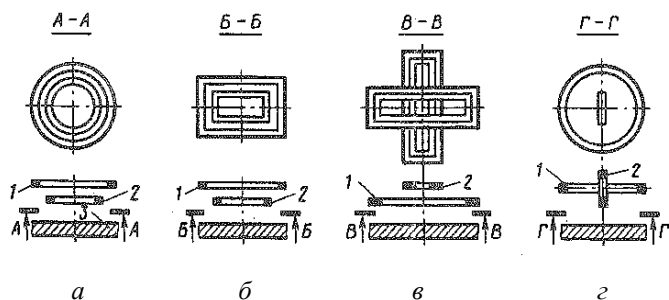


Рис.58. Накладные вихретоковые преобразователи:

1, 2 – возбуждающая и измерительная обмотки; 3 – контролируемый объект

Накладные вихретоковые преобразователи конструктивно выполняют с ферромагнитными сердечниками, благодаря которым повышается чувствительность к изменению контролируемых параметров и формируется заданная ориентация электромагнитного поля.

На рис. 59 показан корпус накладного вихретокового преобразователя с установленным в его нижней части ферритовым магнитопроводом в виде цилиндрического стержня с намотанными на нем обмотками охвачен оправкой с колпачком, сквозь который проходит кабель.

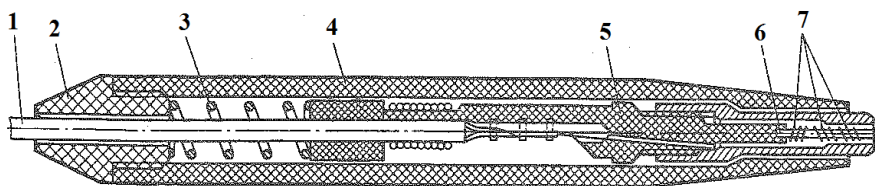


Рис. 59. Накладной вихретоковый преобразователь карандашного типа с подпружиненной катушкой: 1 – кабель; 2 – колпачок; 3 – пружина; 4 – оправка; 5 – корпус; 6 – стержень; 7 – обмотки

Спиральная цилиндрическая пружина между колпачком и корпусом определяет силу, с которой стержень прижимается к поверхности контролируемого объекта.

Оправка сдвигается вдоль оси, сжимая пружину до тех пор, пока нижний торец оправки не прижмется к поверхности контролируемого объекта.

### 7.3. Технология проведения ТВК

При выполнении ТВК контролируемых объектов возбуждение вихревых токов осуществляется переменным магнитным полем, создаваемым катушкой индуктивности вихретокового преобразователя.

Весь процесс контроля (рис. 60) заключается в последовательном сканировании поверхности контролируемого объекта

преобразователем в направлении, поперечном предполагаемому расположению дефекта, обычно трещин.

Необходимо, чтобы шаг сканирования не превышал диаметра сердечника катушки, в противном случае часть мелких трещин может быть не обнаружена.

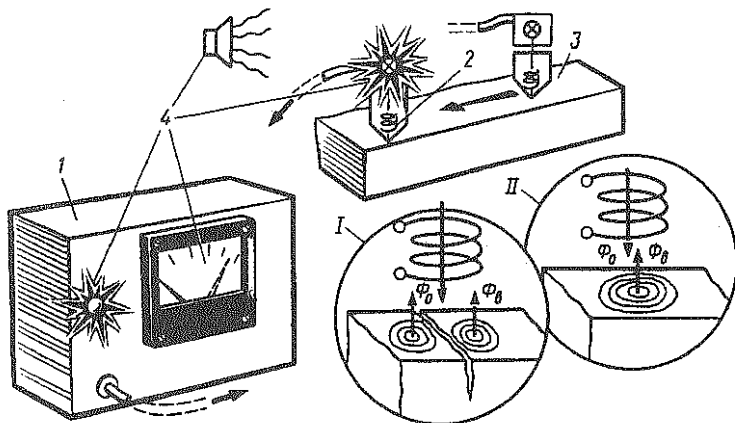


Рис. 60. Схема ТВК немагнитных объектов контроля:

*I, II* – поля вихревых токов в сплошном материале  
и в материале с трещиной;

*1* – электронный блок дефектоскопа; *2* – вихретоковый преобразователь;  
*3* – контролируемый объект; *4* – информативный параметр

Правильное разделение каждого объекта контроля на зоны контроля – является условием эффективного применения дефектоскопов, так как во многих случаях контролировать всю поверхность нет необходимости.

Следует выделять зоны:

- участки вокруг отверстий, заклепок;
- ребра жесткости;
- галтели перехода одинакового (или близкого) радиуса;
- пазы одинаковой ширины;
- и другие участки, подлежащие контролю.

В пределах каждой зоны, исходя из направления и размеров, подлежащих выявлению минимальных дефектов, намечают траектории перемещения датчика.

Для того чтобы обнаружить несплошности длиной менее диаметра датчика, последний необходимо сканировать по поверхности контролируемого объекта, перемещая его вдоль вероятного направления несплошности с шагом, равным половине диаметра датчика.

Для поиска несплошности длиной больше диаметра датчика последний лучше перемещать поперек ее вероятного направления.

При подборе датчика необходимо учитывать форму и размеры зоны контроля, а также ее доступность.

Для контроля объекта, расположенного в малодоступном месте, может потребоваться разработка специального приспособления для доставки датчика в зону контроля, фиксирования его положения и перемещения.

На рис. 61 показаны варианты рабочего положения датчиков при контроле различных зон.

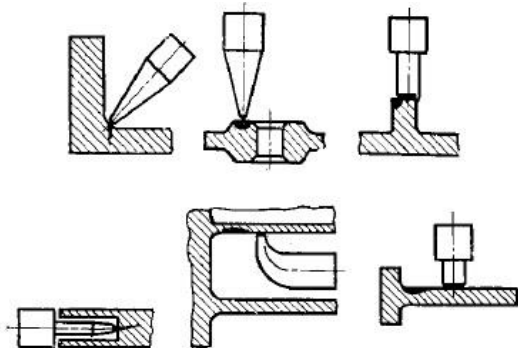


Рис.61. Рабочее положение датчиков при контроле различных зон

Из-за тщательности операции контроля рассматриваемый метод эффективен при обследовании локальных участков (например, кромок лопаток компрессоров и турбин, галтельных переходов и др.). При выполнении контроля при помощи данного метода необходим доступ к контролируемым участкам поверхности.

Качество ЛКП на металлических деталях контролируют электроконтактным методом, который основан на определении электрического сопротивления между вихретоковым преобразователем, помещенным на поверхности объекта контроля, и основанным металлом без покрытия.

В случае нарушения целостности неэлектропроводящих защитных слоев электролит (вода +3 % -ный раствор хромпика)

заполняет полость повреждения и замыкает электрическую цепь, что фиксируется дефектоскопом. Перед контролем электрический щуп присоединяют к непокрытому ЛКП участку. Вихретоковый преобразователь периодически смачивается электролитом и в процессе контроля перемещается по поверхности контролируемого объекта. В качестве проводника используют поливинилформаль, наклеенный на металлическую пластину с припаянным контактным проводом, идущим к выводам дефектоскопа.

Для выявления дефектов типа уплотнений используют вихретоковые толщиномеры; применим также рассмотренный электроконтактный метод.

Дефектоскопический контроль может осуществляться только после предварительного прогрева и проверки дефектоскопа на настроечном образце. Важно, чтобы контролируемая поверхность была очищена от грязи, окислов и пр., а также имела шероховатость не ниже 5-го класса.

На практике бывает так, что вихретоковый дефектоскоп может ошибочно указывать на наличие дефекта (ложное срабатывание). Обычно это вызывается следующими причинами: низкой отрицательной температурой окружающей среды, обрывом в катушке вихретокового преобразователя, влиянием так называемого «краевого эффекта», влиянием постороннего металла в зоне контроля.

Результаты контроля в отдельных случаях подтверждаются дополнительным анализом (обычно методом прямой визуализации или металлографическим).

Для большей наглядности рассмотрим несколько примеров выполнения ТВК для АТ.

#### *Контроль колес шасси ЛА*

На колесах шасси ЛА проверяют большое число разнообразных зон:

- пазы под стопорные кольца;
- канавки под уплотнительные кольца;
- выемку под ниппель;
- галтели перехода от бурта к конической или цилиндрической части несъемной и съемной реборд;
- участки шириной 20–40 мм, примыкающие к галтелям;
- галтели упорного буртика;
- участки вокруг винтов;

- галтели ступицы и другие (для каждого типа колеса выделяют свои зоны контроля).

Рассмотрим последовательность проверки барабана (рис. 62) с четырьмя зонами.

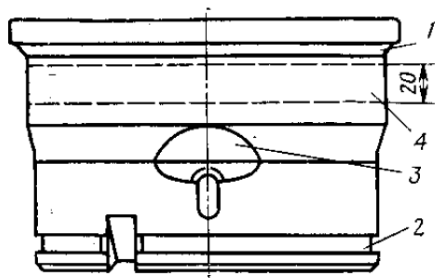


Рис. 62. Зоны контроля на барабане колеса

Контроль проводится после демонтажа пневматика и удаления бензином с поверхности зон 1–4 пригоревшей резины, отслоившегося на отдельных участках ЛКП и грязи.

Сначала настраивают дефектоскоп по трем бездефектным точкам галтели (зона 1). Ее контроль выполняют перемещением датчика вдоль бурта со скоростью 305–0 мм/с, выдерживая его в одном положении – под углом 40–50° к бурту.

При переходе к контролю паза (зона 2) дефектоскоп перестраивают; во время контроля выдерживают нормальное положение датчика относительно поверхности дна паза.

Участок у отверстия под ниппель (зона 3) проверяют после перестройки дефектоскопа, перемещая его датчик вдоль оси колеса с шагом 4–5 мм.

Если в зоне контроля есть магнитная деталь, например, шпонка, винт, датчик дефектоскопа до нее не доводят на расстояние 5 мм во избежание получения ложного показания.

После окончания контроля зон 1–3 (контроль каждой зоны оканчивают проверкой чувствительности) подключают искательную головку, настраивают дефектоскоп, размещая головку в трех точках зоны 4. Затем проверяют ее, перемещая головку со скоростью 30–50 мм/с и поджимая к бурту.

Далее проводится расшифровка полученной информации.



На рис. 63 приведены дефекты колес шасси ЛА, обнаруженные при выполнении ТВК.

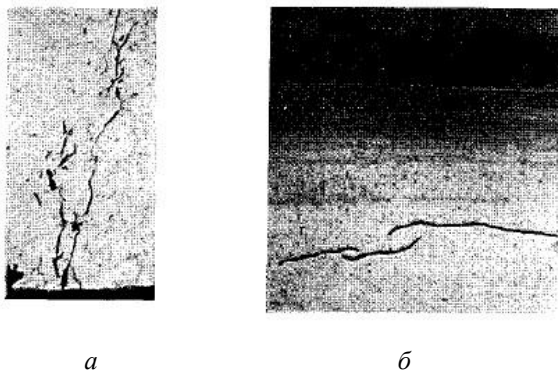


Рис. 63. Дефекты колес шасси ЛА, обнаруженные при выполнении ТВК:  
*a* – поражения межкристаллитной коррозией (вид на микрошлифе);  
*б* – трещины (после удаления покрытия проявлены при помощи КНК)

#### *Контроль отверстий*

Выявление несплошностей, возникающих на поверхности отверстий диаметром 5–30 мм болтовых и заклепочных соединений, задача, которая эффективно может быть решена в ряде случаев только методом ТВК, потому что несплошность на поверхность, доступную для прямого наблюдения, может не выходить (рис. 64, *a, б*).

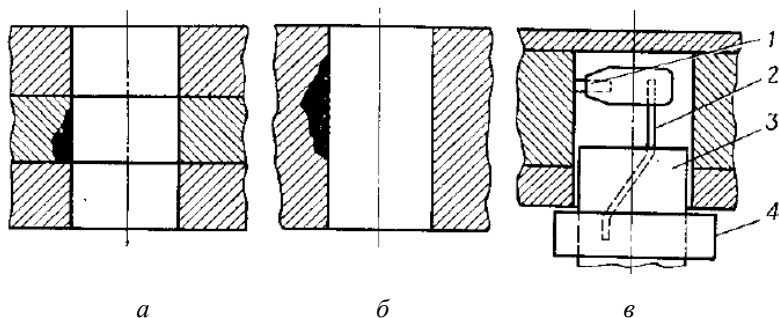


Рис. 64. Возможные места возникновения несплошности на поверхности отверстия (*a, б*) и положение искательной головки при контроле (*в*):  
 1 – датчик; 2 – плоская пружина; 3 – корпус; 4 – ограничительное кольцо

Для контроля отверстий болты выворачивают, а заклепки извлекают так, чтобы не повредить соединенные объекта контроля.

Поверхность отверстия протирают ветошью, смоченной в бензине, удаляют заусенцы. Используют специальную головку, показанную на рис. 15, в.

Диаметр корпуса головки равен диаметру проверяемого отверстия. Положение датчика в зоне контроля фиксируют частью корпуса, вставляемого в отверстие, а также ограничительным кольцом, поджимаемым к плоской поверхности. К проверяемой зоне датчик поджимается пружиной.

В отверстии выделяют краевую зону, зону стыка соединяемых деталей и внутреннюю зону. Дефектоскоп настраивают в каждой зоне.

Для проверки отверстия головку поворачивают вокруг оси, следя за индикаторами дефектоскопа.

ТВК проверяют отверстия в стрингерном наборе центроплана, а также отверстия в узлах подвески шасси и фитингах.

#### *Контроль заклепочных швов обшивки*

Такие швы выполняют заклепками с потайными головками.

Для выявления трещин датчик дефектоскопа размещают на контуре головки заклепки в бездефектном месте и настраивают дефектоскоп.

Затем датчиком, как карандашом, описывают контур каждой заклепки. При таком контроле в обшивке можно обнаружить даже трещины, развившиеся с внутренней поверхности и не вышедшие на открытую часть наружной ее части.

На рис. 65 показаны дефекты в обшивке стабилизатора ЛА, выявленные при помощи ТВК.

#### *Ошибки при выполнении ТВК*

При контроле объектов при помощи ТВК дефектоскописты иногда допускают ошибки, снижающие эффективность данного контроля.

Наиболее распространенными ошибками являются:

- применение неисправных дефектоскопов для ТВК;
- неупорядоченный характер перемещения датчика в контролируемой зоне;
- подключение дефектоскопа без стабилизатора к источнику питания, напряжение которого изменяется в больших пределах.

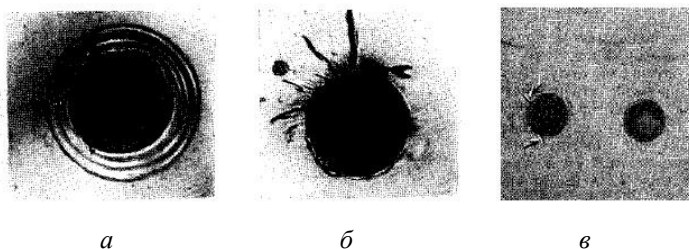


Рис. 65. Трещины в обшивке стабилизатора:

- а* – трещины вокруг отверстия на поверхности раззенковки, скрытые при наличии заклепки ее головкой; *б* – трещины вокруг отверстия (заклепка извлечена, вид с внутренней стороны обшивки); *в* – трещина вышедшая на наружную поверхность обшивки

- контроль объектов, толщина которых близка к глубине проникновения ТВК и в пределах зоны контроля резко изменяется (это может привести как к появлению ложных сигналов, так и к пропуску дефекта);

- применение для проверки настройки дефектоскопа объектов с несплошностями, размеры которых больше минимальных размеров дефектов, которые подлежат выявлению;

- контроль стальных объектов с магнитной неоднородностью материала приводит к появлению ложных сигналов (стальные детали с неоднородными магнитными свойствами, накладными датчиками контролировать не рекомендуется);

- неправильная расшифровка показаний дефектоскопа;

- контроль галтели датчиком, диаметр которого близок к ее радиусу (между датчиком и поверхностью объекта будет значительный зазор, дефект может быть пропущен);

- контроль объектов сложной формы не по зонам при одном режиме настройки дефектоскопа.

## 8. АКУСТИЧЕСКАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ

### 8.1. Общие сведения об акустической дефектоскопии

В основе акустической дефектоскопии лежат акустические колебания – механические колебания частиц упругой среды.

Наиболее распространенными методами акустической дефектоскопии являются:

- эхо-импульсный (применяют для выявления внутренних дефектов в сварных швах силовых узлов, обнаружения трещин усталости на объектах, расположенных в труднодоступных местах конструкции, и др.);

- импедансный (применяют для контроля клеевых соединений в конструкциях с сотовым наполнителем).

Необходимыми условиями для применения эхо-импульсного метода являются:

- материал контролируемого объекта должен обладать упругими свойствами, быть однородным, с малым коэффициентом затухания;

- наличие доступа для ввода ультразвука в контролируемую зону объекта;

- чистота обработки поверхности детали должна быть не менее 5 класса чистоты независимо от наличия ЛКП (при контроле не удаляется).

## 8.2. Физические основы акустической дефектоскопии

### *Природа и свойства акустических волн*

Акустические волны – распространяющиеся в упругой среде механические колебания частичек среды.

При движении волны частицы совершают колебания около своих положений равновесия.

Длина волны  $\lambda$  – расстояние между двумя ближайшими частицами, которые колеблются в одинаковой фазе, она вычисляется по формуле:

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f},$$

где  $c$  – скорость движения волны в материале проверяемой детали;  $T$  – период колебаний;  $f$  – частота колебаний.

В зависимости от направления колебания частиц по отношению к направлению распространения волны различают 4 типа волн (рис. 6б):

- продольные;
- поперечные;
- поверхностные;
- нормальные.

В продольной волне частицы колеблются вдоль направления распространения волны. Эти волны представляют собой чередование зон сжатий и растяжений (рис. 66, *а*). Они могут распространяться в твердых, жидких и газообразных средах.

В поперечной (сдвиговой) волне частицы колеблются перпендикулярно к направлению ее распространения.

Поперечные волны (рис. 66, *б*) могут распространяться только в твердых средах.

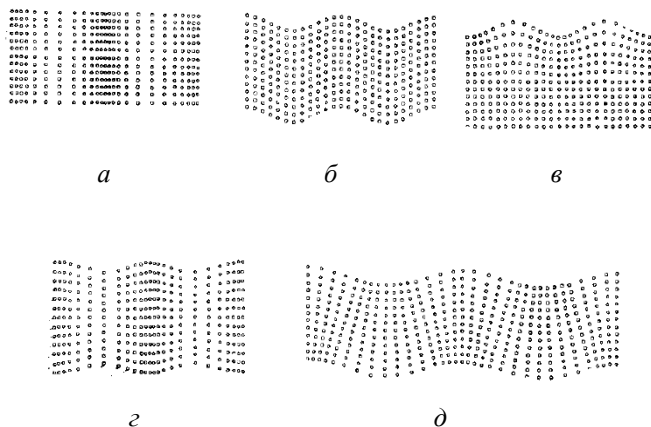


Рис. 66. Распространяющиеся в твердой среде упругие волны: *а* – продольные; *б* – поперечные; *в* – поверхностные; *г* – симметричные нормальные волны (волны растяжения); *д* – асимметричные нормальные волны (волны изгиба)

В поверхностной волне частицы одновременно совершают продольные колебания в направлении распространения и поперечные перпендикулярно к поверхности, описывая эллиптические или более сложные траектории.

Поверхностные волны распространяются по поверхности объекта, следуя ее изгибам и быстро затухая с глубиной (рис. 66, *в*).

Нормальные волны можно возбудить только в тонкостенных (от 0,3 до 10 мм) листах, трубах или в оболочках постоянной толщины. В этих волнах частицы совершают колебания по таким же траекториям, как в поверхностной волне, но на всю толщину листов или стенок оболочек, труб.

Возникают и распространяются независимо одна от другой две нормальные волны (рис. 6б, з, д):

- симметричная (волна растяжения);
- асимметричная (волна изгиба).

Упругие волны в зависимости от частоты бывают:

- инфразвуковые (с частотой колебаний до 16-20 Гц);
- звуковые (от 16 до  $2 \cdot 10^4$  Гц);
- ультразвуковые (от  $2 \cdot 10^4$  до  $10^9$  Гц);
- гиперзвуковые (частота колебания свыше  $10^9$  Гц).

Человеческим ухом для восприятия доступен только звуковой диапазон, остальные волны не слышны.

При акустическом контроле используются ультразвуковые волны частотой от 0,5 до 10 МГц и волны звукового диапазона частотой от 1 до 8 кГц.

Удельным волновым сопротивлением  $z$  характеризуются акустические свойства одной среды по отношению к другой.

Под удельным волновым сопротивлением понимают произведение плотности среды  $\rho$  на скорость распространения в ней продольной волны  $c_{пр}$ :

$$z = \rho \cdot c_{пр}.$$

Соотношение удельных волновых сопротивлений двух сред определяет степень проникновения ультразвуковой энергии из одной среды в другую.

Коротковолновые ультразвуковые колебания по своим свойствам сходны со свойствами световых лучей:

- они так же, как и световые лучи, могут отражаться, преломляться, фокусироваться, интерферировать, испытывать дифракцию и затухать по мере распространения;
- они распространяются в виде направленных лучей.

### 8.3. Ультразвуковая дефектоскопия

Регистрация и генерирование ультразвуковых волн позволяют выявлять дефекты в материале, размеры которых соизмеримы с длиной волны. Данный метод акустической дефектоскопии называется ультразвуковым. Он предназначен для выявления в материале (упругой среде) поверхностных и внутренних дефектов в виде несплошностей, обусловленных условиями нагружения или

неоднородностью структуры (металлургические или производственно-технологические дефекты).

На рис. 67 представлена схема поиска дефектов ультразвуковым дефектоскопом в сварном шве с подкладкой.

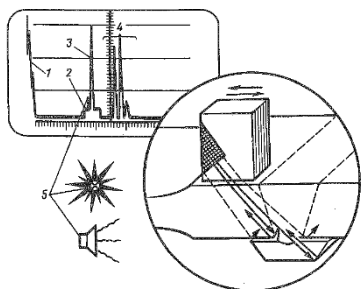


Рис. 67. Схема поиска дефектов ультразвуковым дефектоскопом в сварном шве с подкладкой:  
1,2 – начальный и стробирующий импульсы; 3 – эхо-сигнал от дефекта;  
4 – сигналы от подкладки;  
5 – информативный параметр

Основными моментами в ультразвуковом контроле являются генерирование и регистрация ультразвуковых волн, которые распространяются в среде по законам геометрической оптики и отражаются или рассеиваются от дефектов.

Различают три метода ультразвукового контроля (рис. 68):

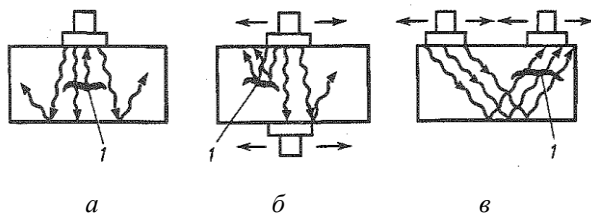


Рис. 68. Схемы ультразвукового контроля:  
а – эхо-метод; б – теневой метод; в – зеркально-теневой метод; 1 - дефект

- эхо-метод (рис. 68, а), основанный на возбуждении в контролируемом объекте коротких импульсов упругих ультразвуковых колебаний и последующей регистрации интенсивности и времени поступления эхо-сигнала, отраженного от дефекта;

- теневой метод (рис. 68, б). Он основан на посылке в контролируемый объект упругих колебаний и регистрации изменения их интенсивности после однократного прохождения через упругие среды. Колебания вводят в контролируемый объект

излучающим преобразователем с одной его стороны, а принимают приемным преобразователем, расположенным с другой стороны;

- зеркально-теневой метод (рис. 68, в) – разновидность теневого метода. При контроле приемную и излучающую головки устанавливают с одной стороны контролируемого объекта. Регистрация интенсивности упругих ультразвуковых колебаний осуществляется после их отражения от противоположной поверхности контролируемого объекта.

Используются три типа ультразвуковых волн (рис. 69):

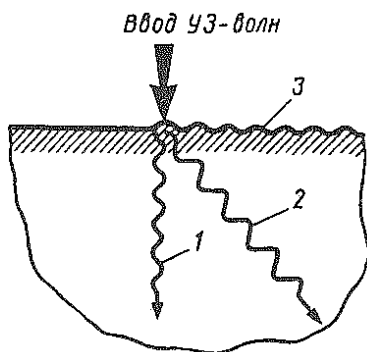


Рис. 69. Ультразвуковые волны: 1 – продольные; 2 – поперечные; 3 – поверхностные

- продольные (направление распространения совпадает с направлением возмущения);

- поверхностные (Релея) – колебания среды распространяются по эллипсоидной траектории с продольной и поперечной составляющими;

- поперечные (сдвиговые) – у них колебания перпендикулярны направлению возмущения.

Возбуждение и прием ультразвуковых колебаний осуществляется с помощью ультразвуковых пьезоэлектрических преобразователей.

Пьезоэлектрические преобразователи применяются из пьезокерамических материалов, их действие основано на пьезоэлектрическом эффекте.



Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что при сжатии и растяжении преобразователей на их поверхностях возникают электрические заряды (рис. 70).

Их знак определяется видом деформации (сжатие или растяжение), а величина – приложенной силой.

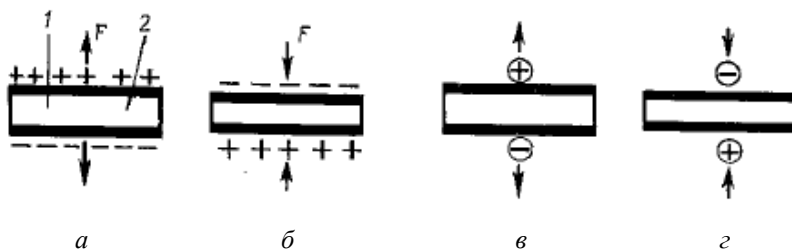


Рис. 70. Пьезоэлектрический эффект:

*a* – прямой эффект; *б* – обратный эффект; *F* – сила растяжения или сжатия; *1* – пьезопластина; *2* – слой серебра

Пьезоэффект обратим: при приложении к поверхностям преобразователя переменного электрического напряжения, преобразователь будет совершать механические колебания (растягиваться и сжиматься) с частотой приложенного напряжения.

Пьезоэлектрический преобразователь позволяет преобразовывать электрические колебания в ультразвуковые и, наоборот, ультразвуковые в электрические.

Изготавливают пьезопреобразователи в форме пластины, цилиндра и т. д. На обе их поверхности наносят тонкий слой серебра.

Различают несколько типов ультразвуковых преобразователей (рис. 71). По углу ввода акустических колебаний ультразвуковые преобразователи:

- прямые (цилиндрические) – генерируют только продольные колебания;
- наклонные (кубической формы) – генерируют сдвиговые и поверхностные волны.

При продольном и наклонном прозвучивании используют преобразователи трех типов:

- совмещенные (в них пьезопластина одновременно выполняет роль излучателя и приемника);

- отдельные (пьезопластина используется только в режиме излучения или приема);
- раздельно-совмещенные (у них одна половина пьезопластины является излучателем, а другая – приемником).

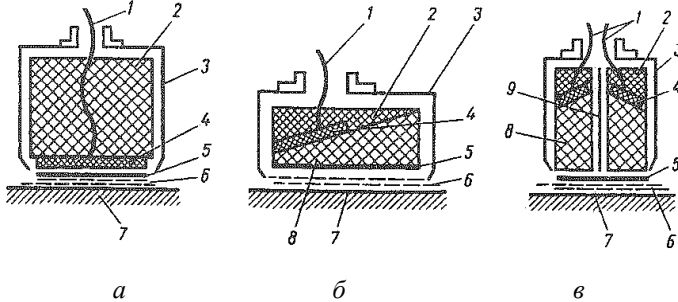


Рис. 71. Конструкции ультразвуковых преобразователей:  
*а* – прямого совмещенного; *б* – наклонного совмещенного; *в* – раздельно-совмещенного; 1 – пьезопластина; 2 – демпфер; 3 – протектор; 4 – контактная жидкость; 5 – контролируемая поверхность; 6 – корпус резонатора; 7 – выводы соединения с электронным блоком; 8 – призма; 9 – электроакустический экран

На электронно-лучевой трубке дефектоскопа регистрируется отражение ультразвука от границ сред с разной плотностью. Эти отражения могут быть различными в зависимости от формы и размеров дефектов (рис. 72).

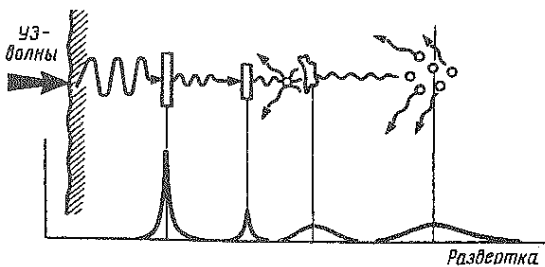


Рис. 72. Схема отражения ультразвуковых колебаний от различных дефектов

Положение дефекта определяют по скорости времени распространения колебаний – расстояние до дефекта равно их произведению.

Скорость ультразвуковых колебаний сильно зависит от свойств среды (2500–6500 м/с), а время прохождения равно половине времени от испускания импульса до возвращения отраженного сигнала.

Распространение упругих ультразвуковых волн в упругой среде показано на рис. 73, а.

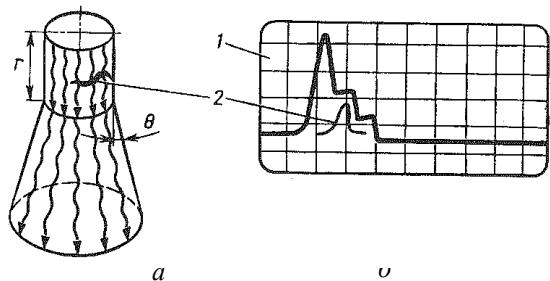


Рис. 73. Схема режима «мертвой зоны» при ультразвуковом контроле:  
1 – экран электронно-лучевой трубки;  
2 – дефект

Изначально волновое поле имеет цилиндрическую форму, а на некотором расстоянии  $r$  – форму усеченного конуса с углом  $\theta$  при вершине.

Интерференция волн в ближней зоне создает негативный эффект «размывания» зондирующего сигнала на экране электронно-лучевой трубки (рис. 73, б).

Работа в режиме «мертвой зоны» возникает, когда сигнал от дефекта, находящегося в ближней зоне, попадает в контур зондирующего сигнала – дефект становится невидимым.

Глубина ближней зоны вычисляется по формуле:

$$r = D^2 / (4 \cdot \lambda),$$

где  $r$  – расстояние от ультразвукового преобразователя;  $D$  – диаметр пьезоэлемента;  $\lambda$  – длина волны.

Угол расхождения пучка лучей в дальней зоне:

$$\sin \theta = (1,22 \cdot \lambda) / D.$$

Из приведенных выше соотношений видно, что снизить возможность работы в «мертвой зоне» можно путем уменьшения пятна контакта ультразвукового преобразователя с контролируемым объектом. Но мощность ультразвуковой волны при этом также будет уменьшаться.

Затухание энергии упругих волн по мере их продвижения в глубь среды обусловлено потерями на внутреннее трение и рассеяние. В разных средах значение затухания различно в зависимости от так называемого удельного волнового, или акустического,

сопротивления, которое равно произведению скорости распространения волн в данной среде  $c$  на ее плотность  $\rho$ .

Большое затухание ультразвуковых волн в воздухе делает необходимым применение контактных жидкостей на границе ультразвукового преобразователя – поверхности контролируемого объекта, в качестве которых могут быть использованы маловязкие моторные масла (для прямых ультразвуковых преобразователей) или глицерин с загустителем (для наклонных ультразвуковых преобразователей).

Мощность ультразвукового луча снижается также вследствие явлений рассеяния, преломления и трансформации колебаний на границе сред с разными плотностями.

Рассмотрим на примере импульсного ультразвукового дефектоскопа, из каких основных частей состоит прибор для проведения контроля (рис/ 74).

Генератор синхронизирующих импульсов необходим для обеспечения синхронизации работы узлов дефектоскопа, реализуя импульсный режим излучения – прием ультразвуковых колебаний. Вне зависимости от режима генератор вырабатывает импульсы, используемые для пуска генератора радиоимпульсов, генератора напряжения развертки, блока цифровой обработки, схемы временной селекции автоматического сигнализатора дефектов.

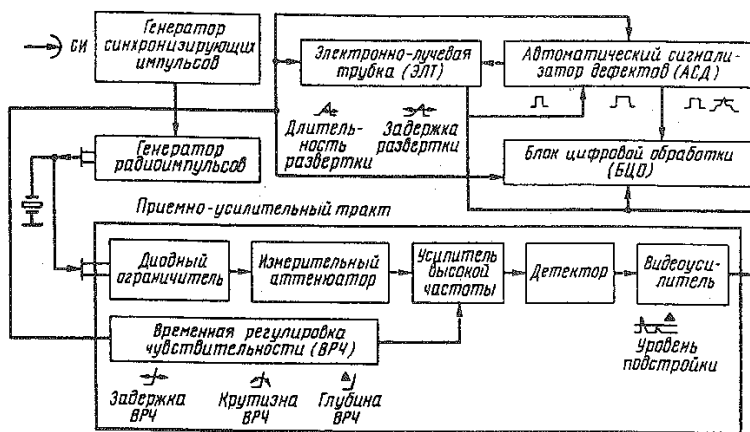


Рис. 74. Обобщенная структурная схема импульсного ультразвукового дефектоскопа

Для формирования высокочастотных электрических импульсов, используемых для возбуждения ультразвуковых колебаний в преобразователе, применяется *генератор радиоимпульсов*.

Высокочастотные электрические колебания пьезопластиной преобразователя трансформируются в механические, которые при наличии акустического контакта вводятся в объект контроля. Дойдя до границы с какой-либо инородной средой (дефектом), эти колебания частично отражаются, регистрируются и преобразуются в приемном преобразователе в электрические импульсы, поступающие на вход приемно-усилительного тракта дефектоскопа.

Для усиления дефектирования сигналов, регистрируемых приемным преобразователем, используется *приемно-усилительный тракт*.

Основные элементы приемно-усилительного тракта:

- двусторонний диодный ограничитель (предназначен для ограничения амплитуды зондирующего импульса на входе усилителя);

- калиброванный делитель напряжения (измерительный аттенюатор позволяет оператору сравнивать уровни эхо-сигналов от различных отражателей);

- усилитель высокой частоты;

- детектор;

- видеоусилитель;

- формирователь управляющего напряжения временного регулирования чувствительности.

Измерительные аттенюаторы выполняют путем цепочечного соединения звеньев на резисторах с изменением вносимого затухания путем переключения звеньев.

*Видеоусилитель* представляет собой схему регулируемой отсечки. Схема обеспечивает передачу сигналов, превышающих заданный уровень, называемый уровнем подавления, без искажений.

Для выработки напряжения, управляющего во времени коэффициентом усиления приемного тракта дефектоскопа, предназначен *формирователь управляющего напряжения временного регулирования чувствительности*. Она позволяет уменьшить время восстановления усилителя после перегрузки его зондирующим импульсом, а также компенсировать ослабление ультразвуковых колебаний в объекте контроля.

В эхо-импульсных дефектоскопах в качестве индикаторов в основном используют электронно-лучевые трубки с электростатическим отклонением луча в виде индикаторов типа А. На экране такого индикатора воспроизводится в масштабе процесс распространения ультразвуковых колебаний в объекте контроля.

На горизонтально отклоняющие пластины подается пилообразное напряжение, вырабатываемое генератором напряжения развертки, для формирования изображения.

Напряжение видеосигналов подается с выхода приемно-усилительного тракта на вертикально отклоняющиеся пластины, в результате чего на линии развертки появляются импульсы, положение которых позволяет судить о расстоянии до отражающей поверхности.

Для измерения координат выявленных дефектов и для измерения длительности и задержки развертки, временных параметров автоматического сигнализатора дефектов и системы временной регулировки чувствительности используется *цифровой индикатор*, или *блок цифровой обработки*.

Длительность неизвестного временного интервала преобразуют в цифровой код путем заполнения этого интервала тактовыми импульсами специального генератора, следующими с фиксированной частотой, и счета числа этих импульсов. Результат отображается на блок цифровой обработки с учетом масштабного коэффициента, зависящего от частоты следования тактовых импульсов.

Автоматический сигнализатор дефектов управляет дополнительными индикаторами. В этом блоке осуществляется временная селекция сигналов, поступающих на его вход с выхода приемно-усилительного тракта.

Временная селекция эхо-сигналов необходима для того, чтобы на дополнительные индикаторы дефектоскопа не поступал зондирующий импульс, а также эхо-сигналы от несплошностей, расположенных вне контролируемого слоя.

### **Импедансный метод дефектоскопии**

Импедансный метод (рис. 75) основан на анализе изменения механического импеданса участка поверхности контролируемого объекта, с которым взаимодействует преобразователь, возбуждающий в объекте контроля изгибные колебания звуковых частот:

$$Z_n = R + wL,$$

где  $R$  – активная составляющая;  $wL$  – реактивная составляющая.

В импедансном методе различаются два способа, в одном из которых используется совмещенный, в другом – раздельно-совмещенный преобразователи.

Совмещенный преобразователь имеет одну зону контакта с контролируемым объектом, а раздельно-совмещенный - две.

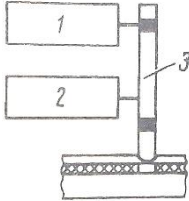


Рис. 75. Схема контроля импедансным методом:  
1 – генератор; 2 – индикатор; 3 – колеблющийся стержень

Совмещенные преобразователи, в свою очередь, делятся на абсолютные и дифференциальные.

В абсолютном преобразователе (рис. 76, а) в режиме холостого хода ( $Z_n = 0$ ) амплитуда выходного напряжения пропорциональна инерционному сопротивлению:

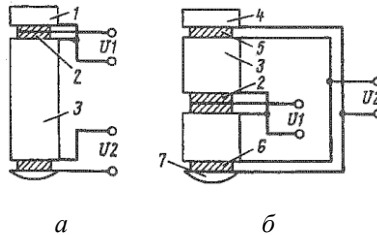


Рис. 76. Схемы абсолютного и дифференциального преобразователей импедансных дефектоскопов:

- 1 – отражающая масса; 2 – излучатель; 3 – звукопроводящий стержень;
- 4 – масса (инерционная нагрузка) компенсационного пьезоэлемента;
- 5, 6 – компенсационный и измерительный пьезоэлементы;
- 7 – контактный наконечник

$$X_m = \omega \cdot (m_1 + m_n / 2),$$

где  $m_1$  – масса контактного наконечника;  $m_n$  – масса измерительного пьезоэлемента;  $\omega$  – круговая частота.

Дифференциальный преобразователь (рис. 76, б) содержит дополнительный компенсационный пьезоэлемент, включенный встречно-параллельно измерительному пьезоэлементу.

В импедансном дефектоскопе с совмещенным преобразователем (рис. 77) последний представляет собой стержень, на торцах которого находятся излучающий и измерительный пьезоэлементы.

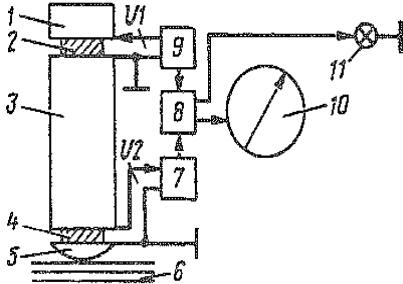


Рис. 77. Структурная схема импедансного дефектоскопа с совмещенным преобразователем:  
 1 – масса (нагрузка);  
 2, 4 – излучающий и измерительный пьезоэлементы;  
 3 – стержень; 5 – контактный наконечник; 6 – контролируемый объект; 7 – усилитель; 8 – блок обработки сигнал; 9 – генератор;  
 10 – стрелочный индикатор;  
 11 – сигнальная лампочка

Между контролируемым элементом и измерительным пьезоэлементом находится контактный наконечник со сферической поверхностью.

Излучающий пьезоэлемент соединен с генератором синусоидального электрического напряжения, измерительный – с усилителем. Масса повышает мощность излучения в стержень.

Генератор и усилитель соединены с блоком обработки сигнала, имеющим стрелочный индикатор на выходе. Блок управляет сигнальной лампочкой дефекта.

В доброкачественной зоне импеданс  $Z_n$  определяется всеми слоями контролируемого объекта, колеблющегося как единое целое. Дефект (непроклей, расслоение) ослабляет механическую связь между отдельными слоями. В зоне дефекта  $Z_n$  обычно уменьшается, что сопровождается изменением угла  $\varphi$ :

$$\varphi = \text{arctg } \omega L / R.$$

При изменении импеданса  $Z_n$  изменяется коэффициент передачи преобразователя:

$$K = U_2 / U_1 = P e^{i\psi},$$



где  $U_1$  и  $U_2$  – комплексные амплитуды электрических напряжений на пьезоэлементах соответственно 2 и 4;  $\psi$ - угол сдвига фазы между напряжениями  $U_2$  и  $U_1$ .

Обычно при контроле  $U_1 = \text{const}$ , поэтому модуль  $K$  пропорционален амплитуде  $U_2$ .

Изменение  $Z_n$  отмечается по изменению  $K$  или  $\psi$ , а также по одновременной трансформации. Соответственно различают амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый варианты импедансного метода НК.

При использовании стоячих волн возбуждают свободные или вынужденные колебания либо контролируемого объекта в целом (интегральные методы), либо его части (локальные методы).

Свободные колебания возбуждают путем кратковременного воздействия на контролируемый объект, например, ударом, после чего он колеблется свободно.

Вынужденные колебания предполагают постоянную связь колеблющегося контролируемого объекта с возбуждающим генератором, частоту которого изменяют. Информационными параметрами являются частоты соответственно свободных колебаний или резонансов вынужденных колебаний, которые несколько отличаются в связи с воздействием возбуждающего генератора.

Эти частоты связаны с геометрическими параметрами контролируемого объекта и скоростью распространения в нем ультразвука.

### **Методика ультразвукового контроля**

При выборе параметров ультразвукового контроля необходимо более детально рассматривать возможные зоны ввода ультразвуковых колебаний, положение вероятных дефектов относительно этих зон, акустические свойства материала детали (скорость распространения ультразвуковых колебаний, акустическое сопротивление, коэффициент затухания ультразвуковых колебаний), а также возможные акустические препятствия на пути распространения ультразвука.

Учитывается технология изготовления детали, узла, технические условия на отбраковку и условия работы детали в процессе эксплуатации.

В методике указывают:

- технические требования на отбраковку;

- зоны контроля, типы используемых волн и искателей, направления прозвучивания, места установки искателей, углы ввода ультразвуковых колебаний и схемы перемещения (сканирования) искателей при поиске дефектов;
- оптимальные значения рабочих параметров дефектоскопа и режим работы;
- контрольный образец с искусственными или натуральными дефектами и порядок настройки дефектоскопа на заданную чувствительность и дальность прозвучивания;
- подготовку поверхности контролируемого объекта и обеспечение акустического контакта;
- порядок контроля;
- расшифровку показаний дефектоскопа, определение характера и размеров дефектов;
- меры по обеспечению техники безопасности при работе.

*Выбор типа ультразвуковых волн, зон и угла ввода волн и направлений прозвучивания*

Способы контроля сварного шва ультразвуковым лучом представлены на рис. 78.

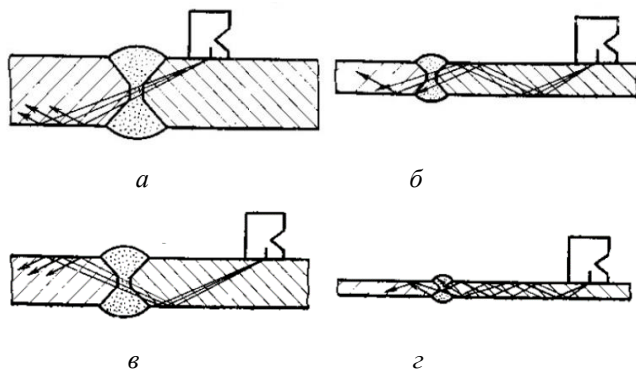


Рис. 78. Способы контроля сварного шва различной толщины ультразвуковым лучом: *а* – прямой; *б* – однократно отраженный; *в* – двукратно отраженный; *г* – многократно отраженный

Для обнаружения внутренних дефектов в деталях сложной формы, расположенных под углом к поверхности ввода ультразвуковых колебаний, применяют поперечные волны, а дефектов, расположенных на поверхности детали (трещин усталости, коррозионных повреждений и др.), поверхностные или поперечные волны, которые вводят в металл наклонными искателями.

Поверхностные волны наиболее предпочтительнее для контроля деталей сложной конфигурации, так как они могут огибать, не отражаясь, вогнутые и выпуклые участки детали.

Нормальные волны применяют в тех случаях, когда необходимо обнаружить поверхностные и внутренние дефекты (расслоения, закаты, пористость и т. д.) в тонких деталях постоянной толщины (трубопроводах, листах).

Продольные волны применяют для контроля деталей большой толщины на наличие внутренних дефектов (раковин, расслоений и т. д.).

Во всех случаях места установки искателей и направления прозвучивания выбирают так, чтобы осевой луч падал на поверхность предполагаемого дефекта под углом, который близок к прямому. При этом определяют, какие возможные сигналы-помехи могут возникнуть от выточек, острых углов, граней, канавок и т. д.

При контроле деталей сложной формы применяют ограничители, позволяющие устанавливать искатель в определенном положении, при котором обеспечивается прозвучивание критических участков детали (рис. 79).

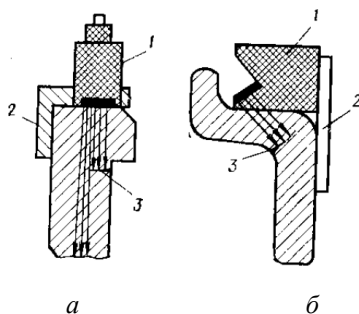


Рис. 79. Положение искателей при ультразвуковом контроле барабанов и реборд колес шасси ЛА: *а* – прямой искатель; *б* – наклонный искатель; 1 – искатель; 2 – ограничитель; 3 – трещина

Для обеспечения контроля всего изделия искатель перемещают по его поверхности с шагом не более диаметра пьезопластины.

### **Выбор оптимальных рабочих параметров дефектоскопа**

Оптимальная частота ультразвуковых колебаний выбирается в зависимости от зернистости материала детали (уровня структурных помех), размеров контролируемой зоны детали, а мощность импульсов, кроме того, и от самой частоты ультразвуковых колебаний.

*Подготовка поверхности контролируемого объекта и обеспечение акустического контакта*

Перед проведением контроля поверхность контролируемого объекта в зоне контроля очищают от отслаивающегося ЛКП, грязи, продуктов коррозии и т. д. Это все делается с целью улучшения условий прохождения волн и устранения возможных случаев появления сигналов-помех.

Контактную смазку для обеспечения акустического контакта между искателем и поверхностью контролируемого объекта выбирают, исходя из чистоты обработки, формы и ориентации поверхности относительно силы тяжести в месте установки искателя, а также в зависимости от температуры окружающего воздуха.

Качество акустического контакта проверяют по амплитуде концевых эхо-сигнала.

### **Настройка дефектоскопа на заданную чувствительность**

Она проводится по контрольным образцам, имеющим специальные контрольные отражатели (искусственные дефекты): отверстие с плоским дном, угловой или сегментный отражатель, глубокую риску, надрез и др. (рис. 80).

Форма, чистота обработки поверхности, материал образца должны быть такими, как у контролируемого объекта. В качестве контрольного образца часто применяют объект, на поверхности которого в месте возможной трещины выполнен искусственный отражатель заданных размеров.

Контрольные образцы с отражателями в виде отверстия с плоским дном или с угловым и сегментным отражателями рекомендуются для настройки дефектоскопов при контроле образцов поперечными и продольными волнами, а образцы с отражателями в виде надрезов и рисков – при контроле поверхностными и нормальными волнами.

Настройка чувствительности дефектоскопа по контрольному образцу проводится следующим образом. На поверхность образца в месте установки искателя наносят тонкий слой контактной смазки.

Искатель устанавливают так, чтобы его осевой луч был направлен на отражатель. Регулируя чувствительность дефектоскопа, устанавливают амплитуду эхо-сигнала от контрольного отражателя 30–40 мм. При установленной чувствительности производится контроль объектов.

Контрольные образцы иногда применяют для точного определения расстояния до дефекта по расположению импульсов на экране дефектоскопа. На контрольных образцах отрабатывают приемы проверки конкретных деталей и приобретают начальный опыт ультразвукового контроля.

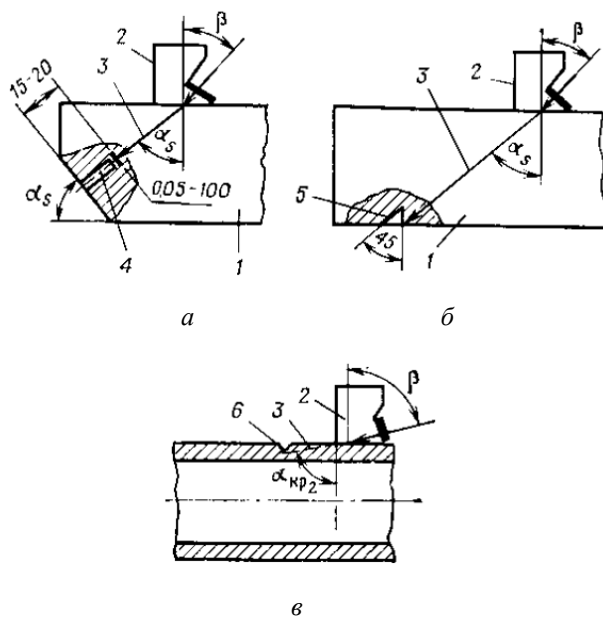


Рис. 80. Контрольные образцы с отражателями в виде отверстия:  
 $\beta$  и  $\alpha$  – углы падения и ввода ультразвукового луча; а – отверстие с плоским дном; б – отверстие с угловым отражателем; в – отверстие с риской; 1 – образец; 2 – искатель; 3 – осевой ультразвуковой луч; 4 – отверстие с плоским дном; 5 – угловой отражатель; 6 – риска треугольной формы

### *Расшифровка показаний дефектоскопа, определение характера и размеров дефектов*

Показания дефектоскопов – это осциллограммы. На них, кроме нужных сигналов (начального, от дефектов и концевого) могут быть сигналы – помехи, которые возникают из-за различных причин. При расшифровке осциллограмм необходимо правильно отличить полезные сигналы от сигналов-помех.

О хорошем акустическом контакте и исправности аппаратуры свидетельствует наличие концевого и начального сигналов. Отсутствие концевого сигнала может быть вызвано плохим акустическим контактом, наличием крупного дефекта и т. д.

При контроле поверхностными, нормальными и поперечными волнами некоторых деталей, например, длинных штоков, цилиндров и др., длина которых больше дальности прозвучивания дефектоскопа, концевого эхо-сигнала в общем не существует.

В случае прозвучивания цилиндрических деталей по окружности на экране возникает эхо-сигнал, который при перемещении искателя не изменяет своего положения. Появление этого сигнала свидетельствует о том, что ультразвуковые колебания прошли по всей окружности (такой сигнал можно рассматривать как своеобразный концевой). Пропадание этого сигнала и появление промежуточного могут быть признаком наличия крупного дефекта.

При возникновении на экране нескольких концевых эхо-сигналов из-за многократного отражения ультразвука от конца детали (в случае контроля короткой детали при большой дальности прозвучивания дефектоскопа) длину развертки устанавливают так, чтобы на экране электронной лучевой трубки наблюдались только начальный и первый концевой эхо-сигналы.

Сигналы-помехи из-за неисправности искателя легко отличить, так как они сохраняются на экране в одном и том же месте при передвижении искателя по поверхности детали и после снятия его с объекта контроля.

При контроле деталей сложной конфигурации определяют места, дающие на экране сигналы-помехи (границы, канавки, выточки и другие конструктивные элементы – отражатели ультразвука). Так, например, зона прессового соединения обоймы подшипника с осью при контроле оси может вызывать помехи в виде широкого эхо-сигнала. В отдельных случаях проводят контроль, фиксируя на экране указанные сигналы-помехи от конструктивных отражателей.

Увеличение амплитуды какого-либо сигнала-помехи может быть признаком наличия дефекта, эхо-сигнал от которого сливается с сигналом-помехой.

Условную протяженность дефекта измеряют длиной зоны перемещения искателя по поверхности контролируемого объекта, например вдоль сварного шва, в пределах которой наблюдается эхо-сигнал от выявляемого дефекта при заданной чувствительности дефектоскопа. Для большей точности измерения вносят поправку, которую определяют измерением условной длины пропила на контрольном образце.

### **Примеры акустического контроля**

Каждый объект контроля проверяют по специальной методике, отличающейся от других типом волны и рабочей частотой ультразвуковых колебаний, размерами и формой искателей, расшифровкой результатов контроля и т. д.

#### *Контроль лопаток роторов компрессоров и турбин ГТД ЛА*

Зонами ультразвукового контроля рабочих лопаток в эксплуатации являются входная и выходная кромки (кроме мертвых зон у замка и конца пера лопатки).

Рабочие лопатки последних ступеней турбин контролируют в реактивной трубе на расстыкованном ЛА, а лопатки компрессоров — через специальные окна.

При контроле искатель прикладывают к кромке у замка или на конце пера лопатки так, чтобы Г-образная контактная поверхность его соприкасалась по радиусу скругления кромки, а уступ Г-образной поверхности был обращен к корыту пера (рис. 81, а). Данное расположение искателя обеспечивает ввод в кромку максимальной энергии ультразвуковых колебаний.

Типичные осциллограммы, возникающие на экране дефектоскопа при контроле лопаток, показаны на рис. 82.

Возникновение только начального сигнала 1 и концевого 2 (рис. 82, а) свидетельствует о хорошем акустическом контакте и отсутствии на кромке дефектов, способных отражать ультразвуковые колебания.

Возникновение концевого 2 и промежуточного 3 эхо-сигналов (рис. 82, б) указывает о наличии дефекта небольшой глубины (например, трещины глубиной до 1–1,5 мм), отразившего часть энергии ультразвуковых колебаний, а возникновение только лишь

промежуточного интенсивного эхо-сигнала 3 и отсутствие концевой (рис. 82, в) – о наличии крупной трещины (глубиной более 1,5 мм), полностью отражающей ультразвуковые колебания.

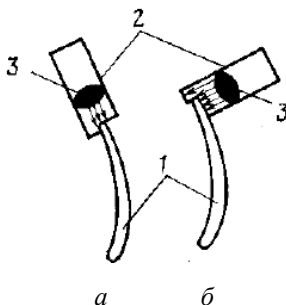


Рис. 81. Положение искателя с Г-образной контактной поверхностью на кромке лопатки: а – правильное; б – неправильное;  
1 – лопатка; 2 – искатель; 3 – пьезопластина

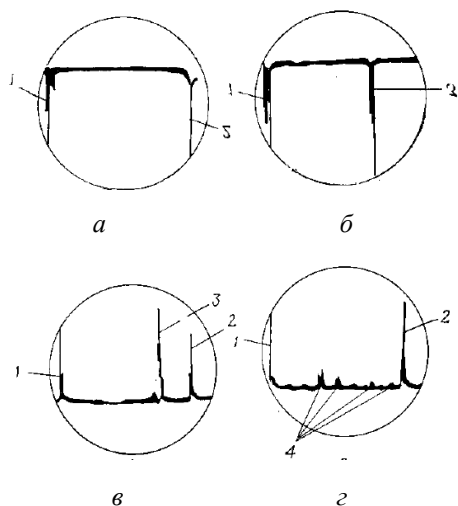


Рис. 82. Типичные осциллограммы, возникающие на экране дефектоскопа при контроле рабочих лопаток:

а – в случае отсутствия дефектов в материале лопатки; б – при наличии дефекта небольшом глубины; в – при наличии крупного дефекта;  
г – при наличии нескольких мелких дефектов; 1 – начальный сигнал;  
2 – концевой сигнал; 3, 4 – промежуточные сигналы



Причинами появления нескольких промежуточных сигналов, которые отличаются по амплитуде (рис. 82, з), могут быть эрозионно-коррозионные поражения, механические повреждения кромки или неоднородность структуры материала, а также мелкие трещины.

Для определения, являются ли выявленные дефекты поверхностными или внутренними, рабочие лопатки, которые дают такого вида осциллограммы, подвергают дополнительному контролю (оптико-визуальному и капиллярному).

В случае, когда при контроле рабочих лопаток на экране наблюдают только начальный сигнал (без конечного и промежуточного), то это свидетельствует о плохом акустическом контакте.

Акустического контакта добиваются путем нанесения контактной смазки и перемещения искателя на некоторое расстояние от места ввода вдоль кромки и поворота ее влево-вправо. Перемещение искателя в данном случае позволяет устранить возможный перекося его из-за вогнутости кромки в месте перехода к замку.

Появление на экране слабого конечного сигнала или его отсутствие при хорошем акустическом контакте является признаком крупнозернистости материала лопатки, рассеивающего ультразвуковые колебания.

На рис. 83 и 84 показаны выявленные с помощью ультразвукового метода дефекты рабочих лопаток компрессора и турбины.

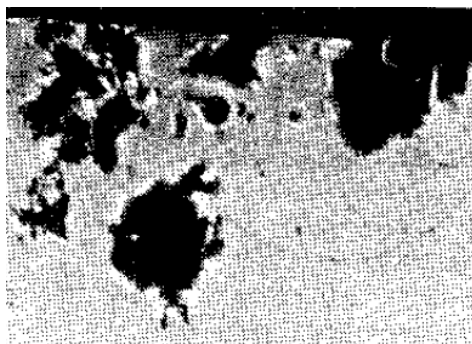


Рис. 83. Эрозионно-коррозионные поражения кромки рабочей лопатки компрессора (120-кратное увеличение)



Рис. 84. Разнозернистость структуры материала кромки рабочей лопатки компрессора (120-кратное увеличение)

### **Контроль клеевых соединений обшивки с сотовым наполнителем**

Рассмотрим методику контроля в амплитудном варианте импедансного метода.

Используются два основных режима контроля: резонансный (применяют при контроле конструкции с толстой металлической обшивкой и жестким внутренним элементом – лонжероном, нервюрой, и др.) и нерезонансный (при контроле сотовых панелей с обшивками из алюминиевого сплава до 0,7–0,8 мм, изделий с металлической обшивкой и пенопластовым наполнителем и др.).

Контроль проводится следующим способом: датчик дефектоскопа перемещают по поверхности контролируемого объекта (рис. 85) и одновременно наблюдают за дефектоскопом. Датчик необходимо перемещать с легким нажимом со скоростью не более 1,5 м/с, удерживая его по нормали к поверхности с точностью  $\pm 10^0$ .

Участки со смятыми сотами могут давать ложные показания, которые могут возникать в виде периодического включения лампочки при контроле тонких обшивок из алюминиевого сплава толщиной 0,3–0,6 мм на сотах с размерами сторон ячеек 6 мм.

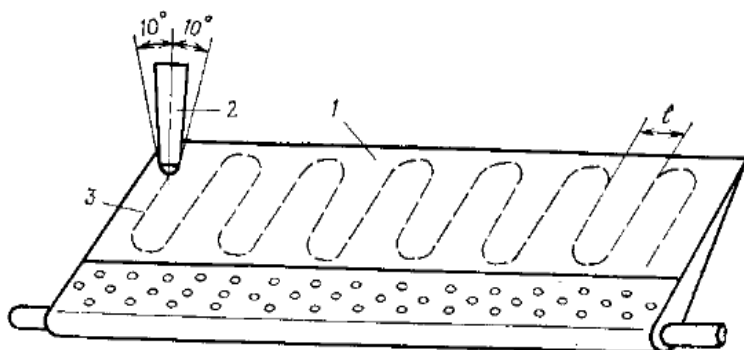


Рис. 85. Схема сканирования датчика при контроле клеевого соединения обшивки с сотовым наполнителем импедансным методом:  
*l* – шаг сканирования; *1* – обшивка; *2* – датчик; *3* – траектория сканирования

Сотовые панели с мелкими и средними ячейками наполнителя (сторона ячейки 2,5–4 мм) и средними толщинами обшивок (0,4–0,6 мм для алюминиевых сплавов) контролируют импедансным методом в фазовом варианте.

#### **Ошибки, возникающие при применении ультразвукового метода**

При ультразвуковом контроле иногда допускают ошибки, снижающие его эффективность.

Перечислим некоторые из них:

- контроль проводится с применением неисправных дефектоскопов и искателей, дающих большие помехи;
- контроль проводится при сильной освещенности, затрудняющей наблюдение за осциллограммами;
- применение некондиционных контрольных образцов;
- в процессе контроля не следят за правильностью установки искателя, не знают, в каком месте экрана ЭЛТ должен возникать концевой эхо-сигнал, так как на нем такое место не отмечают;
- неправильная расшифровка результатов контроля.

## 9. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

### 9.1. Общие сведения

Радиационный контроль (РК) основан на взаимодействии объекта контроля с проникающим ионизирующим излучением (ИИ).

Радиационные МНК классифицируются по используемым видам ионизирующего излучения и подразделяются на следующие методы контроля:

- рентгеновский контроль (1);
- $\gamma$ - контроль (2);
- контроль тормозным излучением ускорителей электронов (3);
- контроль моноэнергетическим  $\beta$ -излучением (4);
- контроль моноэнергетическим  $\beta$ -излучением (5).
- контроль потоком протонов (6);
- контроль потоком тепловых нейтронов (7);
- контроль потоком позитронов (8);

Для контроля сварных и паяных соединений эффективно использование 1–7-го методов, для контроля слитков и отливок и обнаружения в них трещин, пор – 1–3-й виды; неправильности формы внутренних закрытых полостей также уверенно обнаруживаются этими видами излучения.

Микродетали, элементы электронной техники – дефекты пайки, обрывы и оплавление проводов обнаруживаются при применении 1,5,6, 7-го видов, а усталость материала (объекты контроля бывшие в эксплуатации) – 8-м видом.

Основным методом радиационного контроля является рентгеновский метод, который осуществляется при помощи рентгеновского излучения. Информация предоставляется графическим способом (в виде изображения на пленке).

Возможность применения рентгеновского метода зависит от толщины контролируемого объекта (для стали 80 мм, для легких сплавов 250 мм), располагаемой чувствительности контроля, а также плотности материала.

Рентгеновский контроль эффективен при контроле состояния неразъемных соединений, которые закрыты сопряженными элементами. Неэффективен данный метод для контроля

многослойных конструкций из разных материалов – изделий с изменяющейся по глубине плотностью материала.

Недостатком РК является большая трудоемкость и относительно низкая чувствительность, поэтому он применяется только в тех случаях, когда поставленная задача не может быть решена другим методом НК.

## 9.2. Физические основы РК

В РК используются следующие виды ИИ:

- рентгеновское тормозное;
- рентгеновское характеристическое;
- тормозное излучение ускорителей электронов;
- $\gamma$ -излучение;
- $\beta$ -излучение;
- моноэнергетическое  $\nu$ -излучение радиоактивных изотопов;
- моноэнергетическое  $\nu$ -излучение (выводимое из ускорителей);
- поток протонов;
- поток позитронов.

По свойствам излучения можно разделить на фотонное (ионизирующее электромагнитное излучение) и корпускулярное (излучение в виде потока заряженных частиц или нейтронов).

По своей природе рентгеновское излучение, также, как и  $\gamma$ -излучение, является высокочастотными электромагнитными волнами ( $\alpha$ -излучение – поток ядер гелия,  $\beta$ -излучение – поток позитронов или электронов). Рентгеновские лучи, благодаря своей высокой энергии, способны проникать через слои вещества разной толщины. Важное свойство такого излучения – способность оказывать воздействие на серебро эмульсии рентгенпленки (проявляется в почернении пленки после химической обработки).

В качестве источника излучения для просвечивания контролируемого объекта применяются радиоактивные изотопы ( $\gamma$ -излучение) или рентгеновские трубки.

В рентгеновском аппарате рентгеновская трубка служит источником тормозного и характеристического излучений в широком диапазоне энергии – до 1000 кэВ. Они применяются для просвечивания металлических деталей.

### *Свойства ионизирующих излучений*

Рассмотрим 5 свойств ИИ:

- ИИ не воспринимаются ни глазом, ни другими органами чувств человека;

- благодаря очень высокой энергии ИИ способны проникать через слои веществ различной толщины;

- фотонное излучение, потоки заряженных частиц и нейтронов при взаимодействии с веществом ионизируют его молекулы и атомы – под действием этих излучений в веществе образуются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны (такие излучения называют ионизирующими).

Ионизирующие излучения оказывают биологическое действие: ионизируют вещества, из которых состоят клетки живых организмов (это действие приблизительно равно поглощенной дозе излучения). Если человек получит значительную дозу облучения, то у него может наступить лучевое заболевание. На практике существуют различные способы защиты от облучения, которые позволяют длительно работать с источниками ионизирующих излучений без вреда для здоровья;

- ИИ оказывает действие на галогенидное серебро эмульсии рентгеновской пленки, проявляющееся в почернении ее после химической обработки;

- ИИ вызывают люминесценцию некоторых веществ (люминофоров, или сцинтилляторов). На этом свойстве основано действие люминесцентных детекторов излучений для обнаружения и измерения интенсивности излучений.

#### *Характеристическое излучение*

Оно испускается возбужденными атомами при их переходе в основное или менее возбужденное состояние.

Данный процесс заключается в переходе электронов с внешних оболочек атома на внутренние, из которых выбиты электроны при бомбардировке атома заряженными частицами (протонами, электронами и т. д.). В результате акта перехода электрона с одной орбиты на другую излучается порция электромагнитной энергии, именуемая квантом или фотоном:

$$E = E_1 - E_2 = h\nu,$$

где  $E_1$  и  $E_2$  – уровни энергий электронных оболочек;  $h$  – постоянная Планка ( $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $\nu$  – частота излучения.

При прохождении через металл заряженные  $\alpha$ - и  $\beta$ - частицы в основном теряют свою энергию на ионизацию и возбуждение встречных атомов и молекул, а частицы с высокими энергиями,  $E = 10^5$  эВ и более, теряют также энергию в результате торможения атомных ядер в электрическом поле.

Энергетический спектр характеристического излучения имеет дискретный характер, состоит из так называемых  $K$ ,  $L$  и других линий, соответствующих переходу электронов с внешней оболочки на  $K$ ,  $L$  и подобные уровни оболочки (рис. 86).

Для каждого химического элемента свойственно свое характеристическое излучение, и его энергия возрастает при увеличении атомного номера элемента  $Z$ . В основе рентгено-спектрального анализа материалов лежит учет этого явления.

Тормозное излучение возникает при прохождении электрона через поле атома или ядра, которым он тормозится.

Радиационные потери атома – потери энергии электронов на образование тормозного излучения.

У некоторых искусственных радиоактивных изотопов наблюдается позитронный распад. Один протон превращается в нейтрон, и испускается один позитрон и нейтрино, позитрон соединяется с электроном окружающего вещества, при этом образуются два кванта энергии (аннигиляция). Спектр энергии позитронов непрерывный.

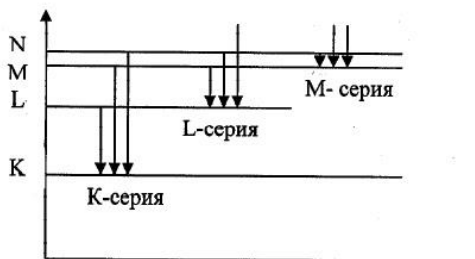


Рис. 86. Характеристическое излучение

Электронный захват – это поглощение ядром орбитального электрона из ближайшей к ядру  $K$ -оболочки ( $K$ -захват). Один из протонов ядра превращается в нейтрон, и заряд ядра уменьшается на

единицу, а на место электрона, поглощенного ядром, переходят электроны с более удаленных орбит, при этом возникает характеристическое рентгеновское излучение (дискретный спектр).

Нейтронное излучение – поток нейтральных частиц (нейтронов), обладающих большой проникающей способностью.

Нейтроны в зависимости от энергии подразделяются на медленные (хорошо поглощаются такими веществами, как бор и кадмий) и быстрые (замедляются водородом и водородосодержащими веществами).

#### *Принцип действия рентгеновских аппаратов*

Источник рентгеновского излучения – двухэлектродная рентгеновская трубка. Жесткость рентгеновского излучения зависит от высокого напряжения, приложенного к трубке, и вычисляется по формуле;

$$\lambda = (12,4 \cdot 10^{-5}) / U,$$

где  $U$  – напряжение на трубке;  $\lambda$  – длина волны.

Методы рентгеновского контроля основаны на принципе ослабления интенсивности излучения, прошедшего объект контроля. Фотоны, сталкиваясь с атомами просвечиваемого материала, теряют свою энергию за счет фотоэлектрического поглощения и рассеяния, за счет преобразования их в кинетическую энергию электронов и рассеянного (вторичного, более длинноволнового по сравнению с падающим) излучения.

На рис. 87 показана схема просвечивания детали рентгеновским излучением.

Если объект контроля неодинаков по толщине, имеет раковину или более плотное включение, то за объектом интенсивность пучка излучения будет неодинакова (в месте раковины, например, она выше, чем в местах, где нет дефектов).

Регистрируя степень ослабления интенсивности излучения за объектом контроля, можно определить наличие в нем дефектов.

Для регистрации радиационных изображений при выполнении контроля в основном используют рентгеновские пленки, после фотообработки экспонированной пленки на ней получается негативное изображение объекта – рентгеновский снимок. На негативе дефекты наблюдаются в виде локального изменения плотности почернения пленки – более плотного по отношению к



фону в местах несплошностей типа трещин, раковин, пористости, непроваров и т. д. и более светлого в местах плотных включений, например вольфрама в стали.

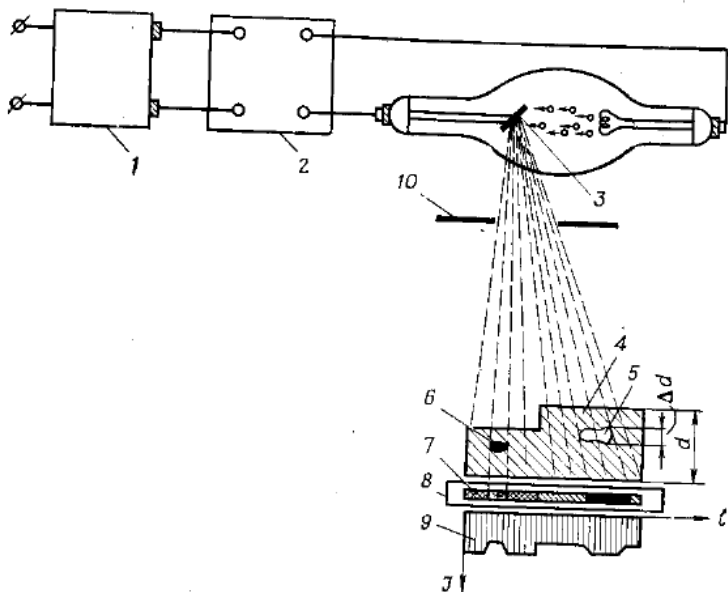


Рис. 87. Схема просвечивания детали рентгеновским излучением:  
 1 – пульт управления; 2 – высоковольтное питающее устройство;  
 3 – фокусное пятно рентгеновской трубки; 4 – контролируемый объект;  
 5 – раковина; 6 – плотное включение; 7 – рентгеновская пленка;  
 8 – кассета; 9 – эюра интенсивности излучения за деталью; 10 – диафрагма

### Сущность рентгеновского контроля

Рентгеновское излучение по своей природе – высокочастотные электромагнитные волны.

Для получения рентгеновского излучения используют рентгеновскую трубку.

Принципиальная схема рентгеновского аппарата представлена на рис. 88. Она представляет собой стеклянную колбу, из которой откачан воздух до  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  Па. В сосуд впаяны два электрода – катод, в виде спирали из толстой вольфрамовой проволоки, и анод из медного полого цилиндра («антикатод») с приваренной к нему мишенью из вольфрама.

К спирали катода подается низковольтное напряжение, а к электродам – высокое напряжение (более 10 кВ).

При накале спирали вследствие термоэлектронной эмиссии из нее вылетают электроны, которые фокусируются специальным устройством в узкий пучок и под действием электрического поля с большой скоростью движутся к аноду.

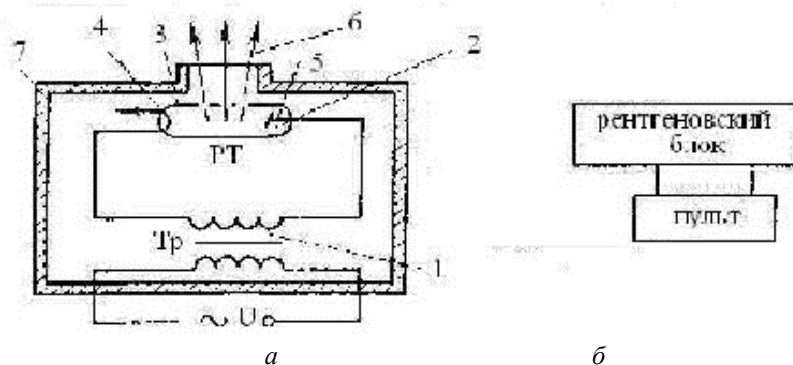


Рис. 88. Схема рентгеновского аппарата:

- а* – принципиальная схема; *б* – блок-схема; 1 – трансформатор;
- 2 – рентгеновская трубка; 3 – стеклянная колба; 4 – катод;
- 5 – анод с мишенью; 6 – рентгеновское излучение; 7 – кожух

Ток, проходящий через трубку, измеряется миллиамперметром на пульте управления. Ток трубки регулируется изменением степени накала нити катода.

Электроны, попадающие на мишень анода, тормозятся в ней и теряют скорость и кинетическую энергию. Кинетическая энергия электронов частично превращается в лучистую энергию, которая

выделяется в виде фотонов тормозного излучения, используемого при дефектоскопии изделий, а часть переходит в тепловую.

Участок мишени анода, на котором фокусируется рентгеновское излучение, – действительное фокусное пятно трубки. Его проекцию в направлении выхода лучей называют эффективным фокусным пятном.

Интенсивность излучения рентгеновской трубки регулируется анодным током и напряжением. При изменении тока (нагрева катода) меняется только интенсивность, а при изменении напряжения меняется еще и энергия излучения. Минимальная длина волны образующегося рентгеновского излучения соответствует максимальной энергии кванта. Энергия кванта тем больше, чем выше скорость электронов. Энергетический спектр тормозного излучения определяется величиной напряжения на трубке. Чем выше напряжение, тем больше скорость электронов, тем больше энергия излучения, тем меньше длина волны и тем больше проникающая способность излучения.

Так как электроны, которые испускаются катодом, имеют непрерывное распределение скоростей, энергетический спектр тормозного излучения имеет непрерывный характер. В нем имеются кванты со всевозможными значениями энергий – от нуля до определенного максимального значения, которое отвечает максимальной кинетической энергии тормозящихся электронов.

В случае, когда энергия электрона настолько велика, что он выбивает электроны с внутренних оболочек атомов вещества мишени, на фоне непрерывного спектра тормозного излучения возникает линейчатый спектр характеристического излучения.

Спектральная интенсивность излучения трубки при различных напряжениях представлена на рис. 89. Ниже  $\lambda_0$  излучения не существует.

Энергия излучения зависит только от напряжения, от величины анодного тока она не зависит.

Существуют различные модификации конструкции рентгеновской трубки:

- двухэлектронные трубки;
- трубки с вынесенным анодом;
- секционированные (каскадные) трубки.

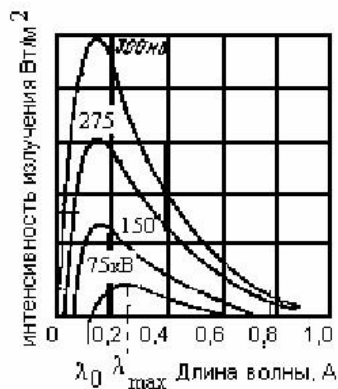


Рис. 89. Спектры тормозного рентгеновского излучения при различных напряжениях

Двухэлектродные трубки имеют электрическую фокусировку электронов, при которой размер фокусного пятна не изменяется во всем диапазоне регулировки анодного тока и напряжения.

Трубки с вынесенным анодом (используются для панорамного просвечивания) имеют дополнительную магнитную фокусировку.

Секционированные (каскадные) трубки применяют при напряжениях от 300 кВ до 2 МВ. Они имеют дополнительные промежуточные кольцевые электроды, которые обеспечивают выравнивание электрического поля по длине трубки.

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

### Технология выполнения РК

Рентгеновский контроль состоит из следующих операций:

- подготовка рабочего места и объекта контроля к просвечиванию;
- зарядка кассет;

- установка аппаратуры, эталонов чувствительности, нумераторов, кассет и других специальных принадлежностей;
- просвечивание – экспонирование пленки;
- фотообработка пленки;
- расшифровка негативов и оценка качества просвеченных объектов контроля.

В операцию по подготовке к просвечиванию входят такие работы, как:

- очистка объекта контроля;
- разметка объекта контроля на просвечиваемые участки и их нумерация;
- определение необходимых приспособлений для рациональной установки кассет, свинцовых листов и т. д.

Далее кассету, которая заряжена пленкой, прикрепляют к контролируемому участку объекта контроля с противоположной ее стороны по ходу излучения. Пленка, по возможности, должна близко прилегать к поверхности контролируемого объекта и располагаться перпендикулярно к осевому лучу пучка.

Непросвечиваемые участки объекта контроля закрывают листовым свинцом или ограничивают поле облучения диафрагмой для снижения интенсивности рассеянного излучения.

При экспонировании пленки нельзя допускать вибрации и сотрясения объекта контроля и источника излучения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. *Каневский И.Н., Сальникова Е.Н.* Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
2. Неразрушающий контроль металлов и изделий: справочник / под ред. Г.С. Самойловича. М.: Машиностроение, 1976. 456 с.
3. *Белокур И.П., Коваленко В.А.* Дефектоскопия материалов и изделий. Киев: Тэхника, 1989. 192 с.
4. *Пивоваров В.А., Машошин О.Ф.* Дефектоскопия гражданской авиационной техники: учеб. пособие для вузов. М: Транспорт, 1997. 136 с.
5. Дефектоскопия деталей при эксплуатации авиационной техники / под ред. П.И. Беды. М.: Воениздат, 1978. 231 с.
6. *Алешин Н.П., Щербинский В.Г.* Радиационная, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия металлоизделий. М.: Высш. шк., 1991. 271 с.
7. Неразрушающий контроль. Россия. 1999-2000 гг.: справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, С.В. Румянцев [и др.]; под ред. В.В. Ключева. М.: Машиностроение, 2001. 616 с.

Учебное издание

*Киселев Денис Юрьевич,  
Макаровский Игорь Мстиславович*

**НЕРАЗРУШАЮЩИЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ**

*Учебное пособие*

Редактор Т.И. Кузнецова  
Компьютерная вёрстка А.В. Ярославцевой

Подписано в печать 11.09.2017. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печ. л. 8,0.  
Тираж 25 экз. Заказ . Арт. 22/2017.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

---

Изд-во Самарского университета.  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**