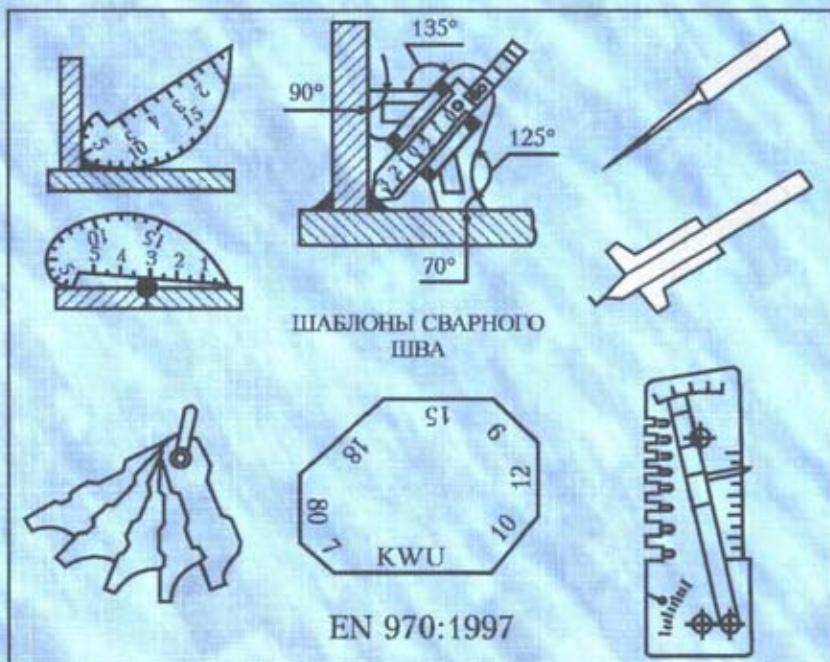


Троицкий В.А.

ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ  
КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН,  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ,  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ



Национальная академия наук Украины  
Институт электросварки им. Е. О. Патона  
Украинское общество неразрушающего контроля  
и технической диагностики

**ТРОИЦКИЙ В.А.**

**ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ  
КОНТРОЛЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН,  
МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ,  
СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Киев  
Феникс  
2009

УДК 620.791.05:620.179.1

ББК 34.641+30.3

Т 70

**Троицкий В.А.**

Т 70      Визуальный и измерительный контроль деталей машин, металлоконструкций, сварных соединений. - Киев: Феникс, 2009. - 275 с. - (на русском языке).  
ISBN 978-966-651-701-5

Рассмотрены основные требования и правила выполнения визуально-измерительного контроля сварных соединений и металлоконструкций, описаны основные технические средства, применяемые для этих целей.

Настоящее пособие будет полезно дефектоскопистам, выполняющим визуально-измерительный контроль, а также абитуриентам, готовящимся получить право на ведение этого вида неразрушающего контроля.

УДК 620.791.05:620.179.1

ББК 34.641+30.3

ISBN 978-966-651-701-5

© ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины, 2009

***20 ЛЕТ***  
***УКРАИНСКОМУ ОБЩЕСТВУ НК и ТД***

В данном учебном пособии изложены требования Центра сертификации Украинского общества НК и ТД к порядку проведения работ по визуальному и измерительному контролю (ВИК), к подготовке и аттестации персонала, средствам контроля, организации работ, документировании результатов ВИК при изготовлении и эксплуатации конструкций и сооружений, на которые распространяется действие надзорных органов.

Визуальный и измерительный контроль основных материалов и комплектующих проводится в качестве входного при их поступлении на предприятие с целью подтверждения соответствия требованиям нормативной документации.

Далее ВИК выполняется при подготовке заготовок перед началом технологических операций, например, перед сборкой соединения под сварку или перед гибкой, формовкой с целью подтверждения соответствия качества материалов требованиям рабочих чертежей объекта. Далее визуально-измерительный контроль проводится на всех этапах технологических процессов и обязательно предшествует радиационным, магнитным, ультразвуковым методам, используемым для поиска внутренних дефектов.

Для эффективного визуально-измерительного контроля необходимо умение пользоваться разнообразными приборами, знать методики проведения работ, правила приемки изделий.

В пособии приведены основополагающие международные стандарты (EN 473, ISO 9712) по подготовке персонала, которые были использованы наряду с материалами фундаментальных работ на эту тему и многолетний опыт специалистов ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины и членов Украинского общества НК и ТД.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Для проведения визуального и измерительного контроля необходимы знания в таких областях науки, как оптика, оптические свойства глаза, светотехника, оптические системы, основы линейных и угловых измерений, классификация дефектов сварных соединений, отливок, паяных соединений [1, 2, 11].

Визуальный контроль – это единственный неразрушающий контроль (НК), обязательный для всех видов производств и эксплуатируемых объектов, который может выполняться с помощью простейших измерительных средств. Этот метод НК требует тщательного выполнения правил и хорошей подготовки персонала. Кроме знаний приемов и техники оператор должен:

- 1) знать свойства материалов, а также как влияют на них условия изготовления, термообработки и эксплуатации;
- 2) знать причины образования дефектов, пути их предотвращения и способы устранения;
- 3) учитывать взаимосвязь между механическими свойствами, конструктивными параметрами и используемыми физическими явлениями;
- 4) знать механизмы разрушения и его типы, т.е. понимать, как и почему происходит разрушение;
- 5) иметь представление об основных физических принципах различных методов НК, которые обычно далее следуют;
- 6) разбираться в способах регистрации, хранении и обработки информации.

В основополагающих нормативных документах по сертификации специалистов НК (например, ISO 9712) предусмотрены требования знаний по материаловедению. Нормативные документы обязывают готовить персонал строго для определенного промышленного сектора: металлургии, литья, сварных соединений и т.п. Этот вид контроля предшествует другим методам и поэтому численность персонала, связанного с проблемами визуального и измерительного контроля, постоянно растет. Дефекты, выявляемые одним методом, могут служить основой для получения априорных сведений, необ-

ходимых для их интерпретации другими методами. Информация о моделях дефектов, регистрируемая многими методами НК, анализируются и интерпретируются визуально. У некоторых методов НК связь с чисто визуальным методом более прямая. Так, критерии видимости дефектов оговариваются для магнитопорошкового и капиллярного методов и некоторых методов течеискания. Выявление и распознавание дефектов проходит, как правило, в условиях различных мешающих факторов. Поэтому уровни освещенности для правильных индикаций качества дефектоскопических материалов, углы зрения, чувствительность к свету и многие другие факторы, относящиеся к зрению дефектоскописта, строго контролируются.

Обучение операторов-дефектоскопистов визуально-измерительным методам заканчивается только тогда, когда надежность проводимого ими контроля становится достаточно высокой и устойчивой. Для интерпретации данных, полученных различными методами НК, дефектоскопист должен знать физические основы того или иного метода, аппаратуру и условия ее оптимального функционирования и иметь достаточный опыт, т.е. визуальный аспект важен, но недостаточен.

Тесная связь между визуальным контролем с другими видами контроля подтверждается использованием одного и того же оборудования НК. Эндоскопы, телевизионные системы и фотоаппараты используются не только для многих процедур визуального оптического контроля, но и в магнитопорошковой и капиллярной дефектоскопии.

Увеличение контраста изображений дефектов, подавление шума и применение различных программ обработки данных, получаемых различными методами НК, тесно связаны со свойствами органа зрения человека. Поэтому здесь изучается орган зрения человека как средство, прямо или косвенно связанное со всеми методами НК.

В данном пособии рассматриваются элементы оптики, светотехники, обработки изображений. Различают *визуальный, визуально-оптический и измерительный контроль*.

Значительную часть информации при проведении визуального, визуально-оптического и визуально-измерительного методов контроля человек получает с помощью зрительного «канала». Зрение позволяет воспринимать графические изображения, передвижения точек по экрану осциллографа, а затем делать выводы о физической сущности происходящего. Процесс «видения» происходит естественно, и мы не задумываемся над тем, как это происходит, значи-

тельная часть суждений о каком-либо определенном объекте предполагает визуальную информацию, которая служит упорядочению и приданию смысла данным, полученным по другим каналам.

Хорошо известно, что «смотреть» и «видеть» далеко не одно и то же [2, 7]. Чтобы «увидеть» надо не просто «смотреть», а смотреть по определенной методике, используя познавательный код, который формируется в процессе накопления сведений об исследуемом объекте. Поэтому грамотный дефектоскопист – это оператор, который не только может внимательно осмотреть объект, но и знает внешний вид всех встречающихся поверхностных дефектов.

*Визуальный контроль* (ВК) проводится при дефектоскопии и контроле материалов и изделий с целью выявления поверхностных трещин, расслоений, закатов, недопустимых забоин, раковин, плен, шлаковых включений, усадочных раковин, подрезов, включений и др.

*Измерительный контроль* (ИК) проводится для проверки соответствия размеров деталей требованиям нормативной документации.

Наши зрительные восприятия могут заметно меняться под влиянием изменения эмоциональных состояний человека, а также произвольного напряжения его внимания. Если, например, в данный момент мы очень заинтересованы в том, чтобы лучше увидеть, нередко зрение фактически становится более острым. Глаз является наиболее чувствительным из всех известных в настоящее время оптических приборов, способен эффективно действовать как в условиях малых, так и больших яркостей [1, 26].

Построить прибор, который одновременно обладал бы такой чувствительностью, как глаз, и такой же способностью различать цвета и особенности оцениваемого изображения очень сложно. Это значит, что все визуальные методы дефектоскопии вряд ли можно заменить какими-либо другими, когда речь идет о поверхностных дефектах.

Визуальный контроль предшествует любому методу НК. Без вспомогательных средств по ГОСТ 23479–79 этот метод имеет чувствительность порядка 0,1 мм. Диапазон длин волн [1, 2] применяемого света должен быть  $0,38\dots0,76\text{ мкм} \approx 4000\dots8000\text{ ангстрем (A)}$ .

Возможности глаза ограничены, особенно при осмотре удаленных и слабо освещенных предметов, а также быстро перемещающихся объектов. При осмотре предметов, находящихся в покое на расстоянии наилучшего зрения (250 мм) при нормальной освещенности (не ниже 300 лк), человек испытывает трудности из-за ограниченных возможностей по разрешающей способности и контрастной чувствительности зрения.

Вспомогательные оптические приборы позволяют намного расширить пределы возможностей глаза, увеличить угловой размер рассматриваемого объекта. Острота зрения и разрешающая способность глаза увеличиваются примерно во столько раз, во сколько крат увеличивает геометрические размеры оптический прибор. Так, удается видеть мелкие объекты, размеры которых находятся за пределами видимости невооруженным глазом. Увеличение углового размера рассматриваемого объекта вследствие преломления световых лучей в оптической системе существенно расширяет возможности метода.

Эффективность ВО контроля может быть повышена, если контролируемый участок металла протравить. Под влиянием реактива растворяются отдельные фазы на поверхности детали, вследствие чего усиливается рельеф и эти участки будут казаться более темными вследствие меньшего коэффициента отражения. При травлении достигается большая контрастность дефектов. Таким способом лучше выявляются дефекты типа неметаллических включений.

ВО контроль используют на различных стадиях регламентных работ и осмотров сооружений, проводимых при их эксплуатации и ремонте.

Производительность ВО контроля обратно пропорциональна разрешающей способности приборов, так как с увеличением их оптических возможностей существенно сокращается поле зрения и глубина резкости, а также снижаются производительность контроля и его надежность. Поэтому для осмотра применяют оптические приборы с увеличением не более 20...30 крат.

Обследование различных объектов соответствует специфике этих сооружений. Поэтому приводится обширная литература по ВО в машиностроении, строительстве, атомной энергетике, трубопроводном транспорте.

## II. МЕЖДУНАРОДНЫЕ, НАЦИОНАЛЬНЫЕ И ОТРАСЛЕВЫЕ СТАНДАРТЫ ПО ВИЗУАЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ

В практике НК сварных соединений используется большое количество различных стандартов. На рис. 1 представлена схема [1] взаимосвязанных базовых европейских стандартов по визуальному контролю сварных конструкций из металлических материалов.



Рис. 1. Взаимосвязанные международные стандарты  
по контролю качества сварных соединений

Европейский стандарт EN 25817:1992 «Соединения стальные, выполненные дуговой сваркой» устанавливает три уровня качества сварных соединений: D – низкий, С – средний и В – высокий. Они применяются для оценки различных видов сварных соединений, а не к готовым изделиям. Этот стандарт определяет критерии уровней

качества стальных сварных соединений для толщин от 3 мм. Он содержит название дефектов, их обозначения, требования по уровням D, C и B: «Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества». Здесь, кроме текстового материала, приведены схематические изображения дефектов по сечениюю соединения.

В базовом стандарте EN 12062:1997 на основе предварительных данных о качестве, материале, виде сварки, толщины сварных швов и объеме контроля содержатся указания по выбору вида НК и по оценке его результатов с точки зрения качества. Стандарт EN 12062:1997 определяет также общие правила и нормы, применяемые при различных видах контроля, как с точки зрения методологии, так и уровней приемки. Уровни приемки не являются прямой интерпретацией уровней качества, определенных в стандартах EN 25817 или EN 30042, так как они связаны с общим качеством изготовленных сварных соединений, оцениваемым как визуальными, так и другими физическими методами НК.

Ниже перечислены термины, используемые в европейском стандарте EN 12062:1997.

*Уровень контроля* – степень точности и выбор параметров, по которым осуществляется контроль. Выбор уровня контроля обычно связан с требованиями к качеству.

*Уровень оценки* – уровень контроля, исходя из которого должна быть оценена индикация дефекта.

*Уровень регистрации* – уровень контроля, исходя из которого индикация должна быть зарегистрирована.

*Уровень приемки* – уровень контроля, нижняя граница которого связана с допустимыми в объекте контроля (OK) несплошностями.

*Индикация* – изображение или сигнал несплошности в форме, доступной при использовании какого-либо метода НК.

*Уровень качества* – установленные пределы для дефектов, соответствующие ожидаемому качеству сварных конструкций. Пределы определяются в зависимости от типов дефектов, их количества и реальных размеров.

В этом стандарте используются специальные сокращения: вихретоковый контроль (ET); магнитопорошковый контроль (MT); капиллярный контроль (PT); радиографический контроль (RT); ультразвуковой контроль (UT); визуальный контроль (VT).

Стандарт EN 12062:1997 требует, чтобы для визуального контроля освещенность поверхности была не менее 350 люкс, а рекомендуемая составляла 500 люкс. Подлежащая контролю поверх-

ность должна рассматриваться под углом более чем  $30^0$  к плоскости этой поверхности и с расстояния не более 600 мм. Визуальный контроль в соответствии с этим стандартом может выполняться:

- при подготовке разделки под сварку;
- во время сварки;
- готового сварного соединения;
- отремонтированного сварного соединения.

В приложениях к стандарту в виде таблицы даются схематические изображения некоторых шаблонов для измерения сварных швов и основные характеристики шаблонов [11].

Проекты новых европейских стандартов более дифференцированы:

- Визуальный контроль. Оборудование – EN 13972;
- Визуальный контроль. Терминология – EN 1330.

Стандарт EN 13018 «Визуальный контроль. Общие принципы» содержит:

- область применения и основные определения;
- ссылки на нормативные документы;
- документацию, необходимую до проведения контроля;
- непосредственный визуальный контроль;
- косвенный визуальный контроль;
- подготовка персонала;
- оценка результатов и документацию после контроля.

Различие *непосредственного* (прямого) и *косвенного* (непрямого) визуального контроля состоят в следующем.

Непосредственный визуальный контроль – это контроль, при котором обеспечен беспрепятственный оптический путь от контролируемой области к глазу наблюдателя. Контроль выполняется либо невооруженным глазом, либо с помощью зеркала, эндоскопа или волоконной оптики.

Косвенный визуальный контроль – это контроль, при котором оптический путь от контролируемой области до глаза наблюдателя прерывается. При косвенном контроле могут использоваться фотографии, видеосистемы и другие промежуточные носители информации.

Письменные инструкции по EN 13018, как минимум, должны содержать:

- объем контроля, наименование оборудование;
- последовательность проведения контроля;
- требования к состоянию поверхности;

- способы подготовки поверхности;
- требования к персоналу, выполняющему визуальный контроль;
- критерии приемки;
- вопросы освещения (тип, уровень и направление);
- документация, оформляемая после контроля.

Персонал, выполняющий контроль, должен быть подготовлен в соответствии с правилами, изложенными в стандарте EN 473-2008, по которому ведет подготовку специалистов Украинское общество неразрушающего контроля и технической диагностики (УО НКТД). Данное Пособие подготовлено на основании этого стандарта.

Действует также стандарт EN 12454:1998 «Литье. Визуальный контроль поверхностных несплошностей. Стальные отливки», отражающий особенности литейного производства. Он здесь также учтен.

Одним из важных показателей качества европейский стандарт EN 1370 рассматривает контроль шероховатости поверхностей. Оценка шероховатости поверхности проводится методом ее визуального сравнения с набором эталонных образцов с помощью соответствующих приборов. Качество подготовки поверхности имеет решающее значение на результаты контроля.

Уровень обнаружения несплошностей, которые должны быть выявлены визуально, сильно зависит от шероховатости поверхности. Часто, например, при массовом производстве отливки должны сравниваться без вспомогательных оптических средств с соответствующими образцами, содержащими естественные дефекты, подлежащие обнаружению.

Сравнение поверхности отливки с образцом должно проводиться при расположении образца рядом с отливкой при равных условиях освещения (минимум 300 люкс).

Изделие считается удовлетворительным, если по качеству оно равно или лучше, чем эталонный образец, используемый для сравнения.

### **III. ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРСОНАЛУ, ВЫПОЛНЯЮЩЕМУ ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ**

Рабочая группа Международного комитета по неразрушающему контролю (ICNDT), в состав которого через EF NDT входит УО НКТД, разработала требования к персоналу, занимающемуся визуальным контролем (WH 24-00). Минимальные требования к персоналу, выполняющему визуальный контроль по данным документа WH 24-00, приведены в табл. 1.

**Таблица 1. Перечень тем и распределение учебного времени для изучения основ визуального контроля по WH 24-00**

Часть	Темы, дисциплина	Уровень, %	
		1	2
1	Принципы визуального контроля	14	6
2	Способы контроля	20	22
3	Характеристики контроля и область его применения	12	10
4	Визуальный контроль в процессе изготовления изделий	40	8
5	Эксплуатационный визуальный контроль, техническое обслуживание	-	30
6	Стандарты, процедуры, инструкции по НК	10	15
7	Другие способы и методы НК	-	5
8	Безопасность и защита окружающей среды, квалификация и аттестация специалистов	4	4

В табл. 1 указано распределение времени в процентном отношении по дисциплинам. Длительность подготовки (час) в соответствии с требованиями стандарта EN 473 для первого уровня квалификации 16 ч, для второго – 24 ч. Общие правила подготовки по всем методам НК приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Программа подготовки персонала, выполняющего визуальный контроль, согласно стандарту EN 473**

Уровень 1	Уровень 2 (дополнительно к программе уровня 2)	Уровень 3 (дополнительно к программам уровней 1 и 2)
1	2	3
<b>1. Основы визуального контроля</b>		
1.1. Введение. Область применения и цель визуального контроля	1.1. Обзор. Применение визуального контроля	1.1. Роль, важность и порядок проведения визуального контроля
1.2. Физические принципы. Свет, освещение. Оптические принципы. Отражение, отражающая способность	1.2. Спектр света, цвет. Освещенность, измерение. Направленное и рассеянное отражение, поглощение	1.2. Яркость, измерение. Контраст; факторы, влияющие на контраст. Геометрическая оптика. Дисторсия. Измерения
1.3. Физиологические факторы. Глаз, его строение, зрительные функции	1.3. Острота зрения, угол зрения, поле зрения	1.3. Характеристика зрения; проверка зрения
<b>2. Способы контроля</b>		
Обращение с оборудованием контроля. Выполнение способов контроля в соответствии с инструкциями по контролю	Выбор способов, пригодных для решения конкретной задачи контроля и определение их области применения, конкретное применение и ограничения	Указание способов и очередности выполнения операций контроля. Подготовка к последующему контролю или исследованиям
2.1. Подготовка контролируемых поверхностей	2.1. Выбор подходящих методов подготовки контролируемых поверхностей	2.1. Рассмотрение характерных требований к состоянию поверхности
2.2. Установка надлежащего освещения и изменение освещенности	2.2. Выбор осветительных устройств и уровней освещенности	2.2. Определение требований по освещенности в особых случаях
2.3. Обеспечение предписанных условий наблюдения и процедур	2.3. Выбор условий наблюдения и способов выявления дефектов. Ослепляющий блеск	2.3. Указания об установке надлежащих условий наблюдения
2.4. Обращение с оборудованием: - датчики и измерительные приборы; - увеличители и микроскопы	2.4. Выбор и применение способов в соответствии с конкретной задачей контроля и определение контролируемой области. Определение параметров для обширных задач	2.4. Определение надлежащих методов, способов и параметров для решения характерных и специальных задач

Продолжение табл. 2

1	2	3
2.5. Эндоскоп. Дистанционный визуальный контроль. Общие сведения	2.5. Эндоскопы. 2.5.1. Жесткие эндоскопы (боросякены). 2.5.2. Гибкие эндоскопы (волоконные эндоскопы). 2.5.3. Видеоскопы. Видеотехнология. Выбор оборудования. Выполнение контроля. Методы оценки размеров дефектов	2.5. Указания о выборе оборудования контроля, процедур, проверках, отчетах и используемой документации
<b>3. Характеристики контроля и область его применения</b>		
3.1. Обычный визуальный контроль: проверка общих условий. Первоначальные сведения о контролируемом изделии, например, его идентификация, установка	3.1. Составление соответствующих характеристик контроля и создание процедур для выявления дефектов	3.1. Оценка важности признаков выявляемых дефектов
3.2. Специальный визуальный контроль: контроль специальных параметров, требующий повышенного уровня освещенности и особого оборудования, например, отклонений формы, текстуры поверхности, дефекты	3.2. Описание контролируемых параметров, условий контроля для их выявления, классификация, оценка и документирование	3.2. Значение контролируемых параметров и суждение о них с учетом пригодности изделия для выполнения задач, для которых оно предназначено
<b>4. Визуальный контроль в процессе изготовления изделия</b>		
Возможные изделия: отливки, изделия, обработанные давлением, вальцованные изделия, тубы	Определение длительности и объема контроля	Углубленные знания применяемых материалов и системы управления качеством
4.1. Технология изготовления и материалы. Дефекты, их вид, места, где они встречаются	4.1. Углубленные знания контролируемых изделий. Распознавание индикаций. Составление проектов каталогов и дефектов	4.1. Знания и опыт работы с материалами изделия
4.2. Выполнение контроля по инструкции	4.2. Составление инструкций по контролю в соответствии с применяемыми стандартами	4.2. Подготовка письменных процедур, описание способов контроля и условий контроля

*Продолжение табл. 2*

1	2	3
4.3. Запись и классификация результатов в соответствии с письменными критериями. Составление отчета	4.3. Оценка дефектов в соответствии с регламентирующими документами и процедурами НК	4.3. Помощь и советы при составлении проекта приемки
5. Эксплуатационный визуальный контроль, техническое обслуживание		
6. Стандарты.		
Инструкции по контролю. Процедуры НК		
Работа с применяемыми стандартами или инструкциями под наблюдением другого специалиста	Составление инструкций по контролю в соответствии с требованиями к фактическим рабочим условиям	Составление процедур визуального контроля, регламентирующих документов
7. Другие способы и методы НК		
Общие представления о методах контроля	Методы контроля поверхностей и обнаружения внутренних дефектов	Технология машинного зрения. Термография. Обработка изображения. Анализ результатов, полученных разными методами
8. Безопасность и защита окружающей среды. Квалификация и аттестация специалистов		

## **IV. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МЕТОДАМ ОПТИЧЕСКОГО ВИДА**

Основной стандарт ГОСТ 23479 «Методы оптического вида» распространяется на НК объектов и устанавливает общие требования к аппаратуре, стандартным образцам, порядку подготовки и проведению контроля, оформлению результатов и требованиям безопасности.

Ниже приводятся его основные положения.

Методы оптического вида [1] основаны на применении электромагнитного излучения в диапазоне длин волн от  $10^{-5}$  до  $10^3$  мкм. Области их применения приведены в табл. 3.

При контроле оптическим методом применяют аппаратуру, соответствующую ГОСТ 12997 и техническим условиям, утвержденным в установленном порядке.

Основными характеристиками аппаратуры оптического контроля являются:

- разрешающая способность;
- диапазон рабочих температур;
- поле зрения;
- предел допускаемой основной погрешности измерения (для аппаратуры с измерительной системой).

Аппаратура оптического контроля должна обеспечивать качество изображения дефектов (яркость, цвет, контраст, размеры), необходимое для оптимальных условий их наблюдения. При выборе аппаратуры для массового контроля предпочтительны приборы с экранным наблюдением, вызывающим меньшее зрительное утомление.

Для проверки аппаратуры непосредственно перед проведением контроля могут быть использованы настроочные образцы с внесением определенного вида дефектов. Наименьший размер выявляемых дефектов должен не менее чем в три раза превышать величину микронеровностей рельефа поверхности ОК.

**Таблица 3. Методы оптического контроля и области их применения**

Название метода	Область применения	Факторы, ограничивающие область применения	Контролируемые параметры	Чувствительность	Погрешность, %
1	2	3	4	5	6
Визуальный	Дефектоскопия, контроль формы	Диапазон длин волн должен быть в пределах 0,38...0,76 мкм	Дефектность, отклонение от заданной нормы	0,1 мм	-
Визуально-но-оптический	Дефектоскопия с помощью микроскопов, эндоскопов и пр.	Минимальная яркость изображения объекта контроля не менее 1 кд/м <sup>2</sup>	Размеры изделий, дефектов, отклонений от заданной нормы	$\frac{0,6\lambda}{A}$	0,1...1,0
Интерферометрический	Контроль формы полированных изделий, анализ шероховатости	Применим только для полированных поверхностей	Сферичность, плоскостность, толщина	$0,1 \lambda$	0,1
Дифракционный	Контроль размеров тонких волокон, острых кромок, структуры	Измеряемые размеры должны быть сравнимы с длиной волны света	Диаметры волокон, размеры дефектов, острых кромок	$0,1 \lambda$	1,0
Поляризационный	Контроль напряжений в прозрачных средах методом фотоупругости	Применим только для оптически прозрачных сред	Вращение плоскости поляризации, двулучепреломление, толщина	$\frac{0,6\lambda}{A}$	1,0
Рефлексометрический	Контроль шероховатости поверхности изделий, измерение блеска	Коэффициент отражения должен быть не менее 1 %	Коэффициент отражения, индикаторика отражения	$\frac{0,6\lambda}{A}$	1,0

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6
Денситометрический	Анализ оптической плотности светофильтров, прозрачных пленок	Применим для нерассеивающих прозрачных сред	Оптическая плотность, коэффициент пропускания	$\frac{0,6\lambda}{A}$	1,0
Колориметрический	Анализ цвета изделий	Наличие источников посторонней засветки	Координаты цвета	100,0 мкм	1,0
Спектральный	Анализ состава газовых смесей, жидкостей, твердых веществ	—	Коэффициенты отражения, поглощения, пропускания	$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 10^{-4}$	1,0
Невелометрический	Анализ структуры кристаллов, стекол, растворов, газов, гранулометрия	—	Коэффициенты рассеяния, концентрация объемных включений	$\frac{0,6\lambda}{A}$	1,0
Стробоскопический	Дефектоскопия и размерный контроль подвижных объектов	—	Угловая скорость	$10^{-6}$ с	5,0
Фотометрический	Измерение характеристик источников оптического излучения	—	Яркость Освещенность	$10^{-4}$ $\text{кд}/\text{м}^2$ $10^{-2}$ лк	5,0
Голографический	Контроль геометрии объектов сложной формы, однородности оптических сред	Малая когерентность лазера, вибрация	Деформации, перемещения, отклонение от заданной формы	$0,1 \lambda$	1,0
Телевизионный	Анализ структуры веществ, измерение линейных размеров	—	Гранулометрические характеристики	$\frac{\lambda}{A}$	1,0

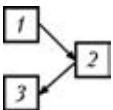
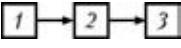
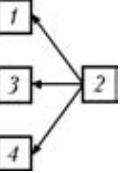
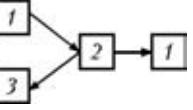
Здесь:  $\Delta\lambda$  – минимальная разность длин волн, при которой возможно измерение спектральных характеристик объектов;  $\lambda$  – длина волны света;  $A = n \sin \alpha$  – апертура оптической системы ( $n$  – показатель преломления;  $\alpha$  – апертурный угол)

Подготовка объекта к операциям контроля включает:

- очистку поверхности, удаление частиц или загрязнений, мешающих проведению контроля;
- определение границы контролируемого участка и характер ожидаемых дефектов;
- изучение инструкций и эксплуатационной документации;
- обеспечение нормальных условий освещенности;
- установление требуемого режима работы и взаимного расположения объекта контроля и аппаратуры.

Схемы испытаний методами оптического вида с позиций освещения и освещенности приведены в табл. 4.

**Таблица 4. Варианты освещения**

Способ освещения	Схема испытаний	Область применения
1	2	3
В отраженном свете		Поиск поверхностных дефектов непрозрачных материалов, измерение линейных размеров
В проходящем свете		Поиск внутренних напряжений, наличия включений в прозрачных материалах, измерение линейных размеров
В рассеянном свете		Диффузно-отражающие поверхности, обнаружение включений по методу темного поля, измерение блеска, цвета и яркости поверхности
Комбинированное освещение		Контроль качества кристаллов, полупрозрачных материалов, анализ структуры и микрорельефа поверхности изделий

В табл. 4 принятые обозначения. 1 – источник излучения; 2 – объект контроля; 3 – приемное устройство; 4 – зеркальная составляющая отраженного потока.

Схема испытаний зависит от размера и формы ОК и выбирается с учетом оптимальных условий выявляемости конкретного типа дефектов. Параметры источника излучения (интенсивность, спектр, поляризация, пространственно-временное распределение интенсивности, степень когерентности) следует выбирать так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения.

Нормы освещенности поверхности объекта при визуальном контроле в зависимости от контраста дефекта с фоном и его размера приведены в табл. 5.

**Таблица 5. Требования по освещенности**

Наи- мень- ший размер дефек- та, мм	Контраст дефекта с фоном	Характе- ристика фона	Освещенность, лк, при системе			
			комбинирован- ного освеще- ния		общего освеще- ния	
			разряд- ными лампами	лампами накали- вания	разряд- ными лампами	лампами накали- вания
До 0,15	Малый	Темный	5000	4000	1500	300
		Светлый	4000	3000	1250	300
	Средний	Темный	3000	3000	1000	300
		Светлый	3000	2000	1050	300
	Большой	Темный	1500	1250	400	300
		Светлый	1500	1250	400	300
От 0,15 до 0,30	Малый	Темный	4000	3000	1250	300
		Светлый	3000	2500	750	300
	Средний	Темный	3000	2500	750	300
		Светлый	2000	1500	500	300
	Большой	Темный	2000	1500	500	300
		Светлый	1000	750	300	250
От 0,30 до 0,50	Малый	Темный	2000	1500	500	300
		Светлый	1000	750	300	200
	Средний	Темный	1000	750	500	300
		Светлый	750	600	300	200
	Большой	Темный	750	600	300	200
		Светлый	400	400	200	150
От 0,50 до 1,00	Малый	Темный	750	600	300	200
		Светлый	500	600	200	150
	Средний	Темный	500	500	200	150

и более		Светлый	500	400	150	100
	Большой	Темный	400	400	150	100
		Светлый	300	300	150	100

Под системой *общего освещения* понимают такое расположение светильников, при котором они создают равномерную освещенность во всех точках производственного помещения.

Под системой *комбинированного освещения* следует понимать такое расположение светильников, при котором на рабочих местах местное освещение, а по всей площади помещения – общее, создающее освещенность не менее 10 % от значений, установленных в табл. 5.

Контраст изображения определяют по формуле

$$K = \frac{B_\phi - B_o}{B_\phi},$$

где  $B_o$  – яркость изображения дефекта  $\text{кд}/\text{м}^2$ ;  $B_\phi$  – яркость фона, окружающего дефект,  $\text{кд}/\text{м}^2$ . При  $K > 0,5$  контраст считают большим, при  $0,2 < K < 0,5$  – средним, при  $K < 0,2$  – малым.

Операции контроля должны проводиться с учетом климатических характеристик и требований размещения аппаратуры, изложенных в паспорте и инструкции по эксплуатации. Контроль объектов должен осуществляться в соответствии с методикой контроля на конкретные типы аппаратуры и объекта и включать следующие операции:

- установку ОК и аппаратуры в требуемое положение;
- введение объекта в режим контроля (освещение, устранение смещения или вибрации и т.п.);
- наблюдение и (или) измерение контролируемого параметра;
- контроль качества объекта посредством сравнения его со стандартным образцом и другим способом;
- обработку результатов.

Методика контроля должна разрабатываться предприятием-изготовителем ОК и утверждаться в установленном порядке.

## V. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Стандартом ГОСТ 24521-80 установлены термины и определения основных понятий в области оптического НК (табл. 6).

**Таблица 6. Термины и определения основных понятий в области оптического НК (ГОСТ 24521-80)**

№ пп	Термин	Определение
1	2	3
1	Оптический неразрушающий контроль	НК, основанный на анализе оптического изображения ОК
2	Контраст дефекта	Отношение разности яркостей дефекта и окружающего его фона к одной из них либо к их сумме
3	Видимость дефекта	Отношение фактического контраста к его пороговому значению
4	Метод прошедшего оптического излучения	Регистрация параметров оптического излучения, прошедшего сквозь ОК
5	Метод отраженного оптического излучения	Регистрация параметров оптического излучения, отраженного от ОК
6	Метод рассеянного оптического излучения	Регистрация параметров оптического излучения, рассеянного ОК
7	Метод собственного оптического излучения	Регистрация параметров собственного излучения ОК контроля
8	Метод индуцированного оптического излучения	Регистрация параметров оптического излучения, генерируемого ОК при постороннем воздействии на него
9	Спектральный метод оптического излучения	Анализ спектра оптического излучения после взаимодействия с ОК
10	Когерентный метод оптического излучения	Измерение степени когерентности оптического излучения после взаимодействия с ОК
11	Амплитудный метод оптического излучения	Регистрация интенсивности оптического излучения после взаимодействия с ОК

*Продолжение табл. 6*

1	2	3
12	Временной метод оптического излучения	Регистрация времени прохождения оптического излучения через ОК
13	Геометрический метод оптического излучения	Регистрация направления оптического излучения после взаимодействия с ОК
14	Поляризационный метод оптического излучения	Регистрация степени поляризации оптического излучения, после взаимодействия с ОК
15	Фазовый метод оптического излучения	Регистрация фазы оптического излучения после взаимодействия с ОК
16	Интерференционный метод оптического излучения	Анализ интерференционной картины, получаемой при взаимодействии когерентных волн, опорной и модулированной ОК
15	Фазовый метод оптического излучения	Регистрация фазы оптического излучения после взаимодействия с ОК
16	Интерференционный метод оптического излучения	Анализ интерференционной картины, получаемой при взаимодействии когерентных волн, опорной и модулированной ОК
17	Дифракционный метод оптического излучения	Анализ дифракционной картины, получаемой при взаимодействии когерентного оптического излучения с ОК
17	Дифракционный метод оптического излучения	Анализ дифракционной картины, получаемой при взаимодействии когерентного оптического излучения с ОК
18	Рефракционный метод оптического излучения	Регистрация параметров преломления оптического излучения ОК
19	Абсорбционный метод оптического излучения	Анализ параметров поглощения оптического излучения ОК
20	Визуально-оптический метод оптического излучения	Наблюдение ОК или его изображения с помощью оптических или оптико-электронных приборов
21	Фотохимический метод оптического излучения	Анализ параметров фотохимических процессов, возникающих при взаимодействии оптического излучения с ОК
22	Оптико-акустический метод оптического излучения	Анализ параметров оптико-акустического эффекта, возникающего при взаимодействии оптического излучения с ОК

*Продолжение табл. 6*

1	2	3
23	Фотолюминесцентный метод оптического излучения	Анализ параметров люминесценции, возникающей при взаимодействии оптического излучения с ОК
24	Электрооптический метод оптического излучения	Поляризационный метод оптического контроля, основанный на дополнительном взаимодействии на ОК внешнего электрического поля
25	Магнитооптический метод оптического излучения	Поляризационный метод оптического контроля, основанный на дополнительном воздействии на ОК магнитного поля
26	Метод согласованной фильтрации оптического излучения	Анализ изображения ОК с помощью оптического согласованного фильтра
27	Метод разностного оптического изображения	Регистрация различий в изображениях ОК и контрольного образца
28	Метод фотоэлектрического эффекта оптического излучения	Анализ параметров фотоэлектрического эффекта, возникающего при облучении ОК оптическим излучением
29	Метод спекл-интерферометрии оптического излучения	Метод, основанный на использовании пространственной корреляции интенсивности диффузно-когерентного оптического излучения для получения интерференционных топограмм ОК
30	Метод спекл-структур оптического излучения	Метод, основанный на анализе спекл-структур, образующихся при отражении когерентного оптического излучения от шероховатости поверхности ОК
31	Метод муаровых полос	Метод, основанный на анализе топограмм ОК, получаемых с помощью оптически сопряженных растроев
32	Фотоимпульсный метод контроля геометрических размеров изделия	Метод, основанный на измерении длительности импульсов, оптического излучения пропорциональных геометрическим размерам объекта и получаемых с помощью сканирования его изображения

*Продолжение табл. 6*

1	2	3
33	Фотокомпенсационный метод контроля геометрических размеров изделия	Измерение изменений интенсивности оптического излучения, вызванных отклонением геометрических размеров объекта от контрольного образца
34	Фотоследящий метод контроля геометрических размеров изделия	Метод, основанный на регистрации перемещений, пропорциональных изменению геометрических размеров ОК
35	Голографический метод оптического неразрушающего контроля	Сопоставительный анализ голографических изображений реальных и бездефектных поверхностей
36	Прибор оптического неразрушающего контроля	Система, состоящая из осветительных, оптических и регистрирующих устройств, а также средств калибровки и настройки
37	Источник излучения прибора оптического контроля	Часть прибора, предназначенная для освещения ОК
38	Оптическая система	Часть прибора оптического контроля, предназначенная для формирования пучков оптического излучения
39	Приемное устройство	Прибор регистрации первичного информативного параметра
40	Оптический дефектоскоп	Прибор, предназначенный для обнаружения неоднородностей поверхности оптическими средствами
41	Лазерный эллипсометр	Прибор, предназначенный для измерения толщины и (или) показателя преломления прозрачных пленок поляризационным методом
42	Оптический структурископ	Прибор, предназначенный для анализа структуры и (или) физико-химических свойств материалов и изделий
43	Оптический толщиномер	Прибор, предназначенный для измерения толщины ОК и (или) глубины залегания дефектов
44	Световое сечение	Сечение плоского пучка света для получения изображения рельефа поверхности

*Продолжение табл. 6*

1	2	3
45	Темное поле	Освещение, при котором яркость дефектов больше яркости поверхности, на которой они расположены
46	Световое поле	Освещение, при котором яркость дефектов меньше яркости поверхности, на которой они находятся
47	Стробоскопическое облучение	Облучение модулированным излучением, частота и фаза которого синхронизированы с движением
48	Когерентное облучение	Облучение когерентным излучением
49	Монохроматическое облучение	Облучение монохроматическим излучением
50	Полихроматическое облучение	Облучение полихроматическим излучением
51	Сканирующее облучение	Облучение оптическим излучением с применением сканирования
52	Телецентрическое облучение	Облучение параллельным пучком оптического излучения
53	Стигматическое облучение	Облучение точечным источником оптического излучения
54	Наблюдение двойного изображения	Одновременное наблюдение оптически совмещенных изображений ОК и контрольного образца
55	Наблюдение сведенного изображения	Одновременное наблюдение отдельных частей изображения, спроектированных на плоскость анализа
56	Сравнительное наблюдение	Наблюдение изображений и контрольного образца, разделенных пространственно
57	Разрешающая способность аппаратуры	Наименьшее расстояние между точками, раздельно регистрируемыми устройством контроля, выраженное в линейной или угловой мере
58	Поле зрения аппаратуры	Область, в которой проводится контроль и которая измеряется в линейной или угловой мере
59	Чувствительность	Минимальный размер дефекта, выявляемого с заданной вероятностью

*Продолжение табл. 6*

1	2	3
60	Спекл-структура	Случайное распределение интенсивности, характерное для диффузно-когерентного излучения
61	Сканирование	Анализ исследуемого пространства путем последовательного его просмотра
62	Эндоскоп	Оптический прибор, предназначенный для осмотра внутренних поверхностей ОК
63	Оптический компаратор	Оптический прибор, предназначенный для одновременного наблюдения ОК и контрольного образца
64	Субтрактивный видеоанализатор	Оптический прибор для формирования разностного изображения ОК и контрольного образца
65	Оптический дисдрометр	Оптический прибор для анализа объемного распределения микрочастиц в контролируемой среде

В табл. 6 перечислены определения, охватывающие основные понятия визуального контроля. В ГОСТ 24521-80 есть два приложения: Приложение 1, содержащее общефизические термины и определения, и Приложение 2, в котором представлены термины и определения устройств, применяемых при оптическом НК.

## VI. ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ПЛАВЛЕНИЕМ

Европейским стандартом EN 970:1997 установлены требования к проведению визуального контроля швов, полученных сваркой плавлением металлических материалов.

**Условия контроля и приборы контроля.** Освещенность контролируемой поверхности должна быть не менее 350 лк; рекомендуемая освещенность 500 лк. Необходим достаточный обзор, подлежащая контролю наружная поверхность должна рассматриваться под углом более чем  $30^{\circ}$  к плоскости ОК и с расстояний до 600 мм (рис. 2). Если при контроле с больших расстояний используются бороскопы, стекловолоконные световоды или камеры, то они должны удовлетворять дополнительным требованиям, определяемым применяемым стандартом или соглашением. Для создания хорошего контраста изображения дефекта с фоном и его уверенного обнаружения при необходимости применяют дополнительный источник света. Объем визуального контроля заранее устанавливается соглашением между заинтересованными сторонами. Контролеру предоставляются необходимые документы по производству. Сварные швы [11] подвергаются контролю непосредственно после освобождения их от шлака, брызг, остатков изоляции и пр.

*Визуальный контроль во время сварки* включает наблюдение за тем, чтобы:

- каждый наплавленный валик или каждый слой материала шва очищался прежде, чем на него накладывается следующий слой;
- отсутствовали видимые несплошности, например, трещины или раковины;
- было достигнуто удовлетворительное сплавление шва с основным металлом для продолжения сварки;



Рис. 2. Схема проведения визуального контроля

- соответствуют ли глубина и форма подготовки кромок техническим условиям;
- обеспечено ли условие полного заполнения разделки шва.

*Визуальный контроль готового сварного шва* проводится на соответствие шва заданным стандартам, например, EN 25817, EN 30042, EN 12062. Необходимо убедиться в том, что на контролируемом сварном шве:

- удален шлак, зачищена поверхность, не маскируются дефекты;
- не остались следы воздействия инструмента или царапины от шлака;
- при шлифовке не было перегрева, не осталось углублений и неровностей;
- угловые и стыковые соединения с основным материалом выполнены плавным переходом к основному металлу;
- форма наружной поверхности шва, его валика усиления соответствуют стандарту;
- высота валика усиления и его положение относительно свариваемых деталей измерены шаблонами, если это требуется техническими условиями;
- ширина шва по всей его длине одинакова и при этом соответствует стандарту; про контролировано заполнение разделки шва.

Любые незначительные дефекты наружной поверхности шва или в зоне термического влияния, такие как трещины или пористость, соответствуют критериям приемки. После термической обработки может потребоваться дополнительный контроль.

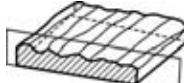
*Визуальный контроль отремонтированного сварного шва* следует провести после того, как выполнена зачистка и удалены все несплошности, а также убедиться, что скосы от основания зачистки до наружной поверхности шва одинаковые. Ширина и форма зачистки должны быть такими, чтобы оставалось достаточно места для последующей ремонтной сварки. Кроме обычных средств визуального контроля (линейки, лупы, шаблонов, штангенциркулей и т.п.) иногда может потребоваться следующие принадлежности:

- профилометр с проволочным измерителем диаметром или шириной  $\leq 1$  мм; оба конца проволоки должны быть закруглены;
- материал для получения отпечатка сварного шва, например, твердеющий при остывании, искусственный или тестообразный материал;
- зеркала, эндоскопы, бороскопы, световоды или телевизионные камеры.

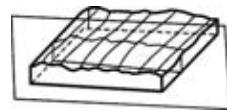
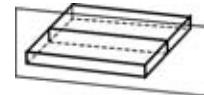
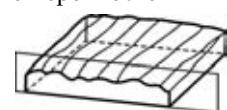
## **VII. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ**

Стандартом ГОСТ 25142-82 установлены термины и определения основных понятий, относящихся к шероховатости поверхности (табл. 7).

**Таблица 7. Термины и определения основных понятий, относящихся к шероховатости поверхности**

№ пп	Термин	Определение
1	2	3
1	Реальная поверхность	Поверхность, ограничивающая тело и отделяющая его от окружающей среды 
2	Номинальная поверхность	Поверхность, заданная в технической документации без учета допускаемых отклонений 
3	Базовая линия (поверхность)	Линия (поверхность) заданной геометрической формы, проведенная определенным образом и служащая для оценки геометрических параметров поверхности
4	Нормальное сечение	Сечение, перпендикулярное базовой поверхности 
5	Косое сечение	Сечение, наклонное к базовой поверхности 

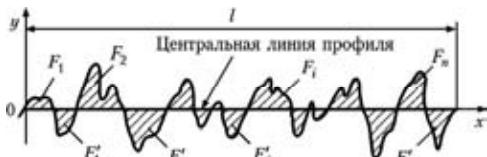
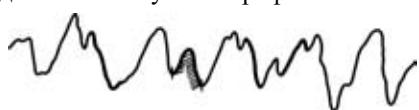
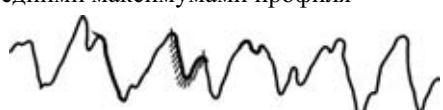
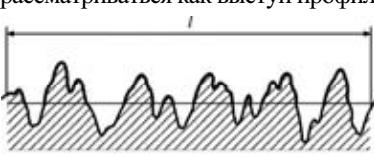
Продолжение табл. 7

1	2	3
6	Эквидистантное сечение	Сечение реальной поверхности, имеющей форму номинальной поверхности и расположенной эквидистантно базовой поверхности 
7	Касательное сечение	Эквидистантное сечение, касательное реальной поверхности для случая плоской номинальной поверхности 
8	Контурная картина поверхности	Совокупность линий пересечения реальной поверхности эквидистантными сечениями 
9	Профиль поверхности	Линия пересечения поверхности с плоскостью
10	Реальный профиль	Профиль реальной поверхности 
11	Номинальный профиль	Профиль номинальной поверхности 
12	Поперечный профиль	Профиль, получаемый при сечении поверхности плоскостью, перпендикулярной направлению неровностей 

Продолжение табл. 7

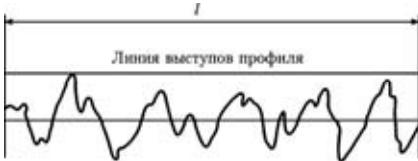
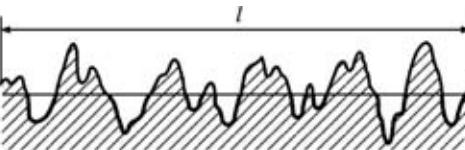
1	2	3
13	Продольный профиль	Профиль, получаемый при сечении поверхности плоскостью, параллельной направлению неровностей
14	Периодический профиль	Профиль, который может быть описан периодической функцией
15	Случайный профиль	Апериодический профиль, который описывается случайной функцией
16	Базовая длина $l$	Линия, используемая для выделения неровностей, характеризующих шероховатость поверхности
17	Длина оценки $L$	Длина, на которой оцениваются значения параметров шероховатости. Она может содержать одну или несколько базовых длин
18	Отклонение профиля $y$	Расстояние между точкой профиля и базовой линией
19	Средняя линия профиля	Базовая линия, имеющая форму номинального профиля и проведенная так, что в пределах базовой длины среднеквадратическое отклонение профиля до этой линии было минимально

Продолжение табл. 7

1	2	3
20	Центральная линия профиля	Базовая длина, имеющая форму номинального профиля, расположенная эквивалентно общему направлению профиля и делящая профиль так, что в пределах базовой длины суммы площадей, заключенных между этой линией и профилем, по обе стороны были одинаковы 
21	Система средней линии	Система отсчета, используемая при оценке параметров шероховатости поверхности, в которой в качестве базовой линии используется средняя линия
22	Местный выступ профиля	Часть профиля, расположенная между двумя соседними минимумами профиля 
23	Местная впадина профиля	Часть профиля, расположенная между двумя соседними максимумами профиля 
24	Местная неровность	Местный выступ и сопряженная с ним местная впадина
25	Выступ профиля	Часть профиля, соединяющая две соседние точки пересечения его со средней линией профиля, направленная из тела. Часть профиля, направленная из тела, в начале или конце базовой длины должна всегда рассматриваться как выступ профиля 

Продолжение табл. 7

1	2	3
26	Впадина профиля	Часть профиля, соединяющая две соседние точки пересечения его со средней линией профиля, направленная в тело. Направленная в тело часть профиля в начале или конце базовой длины всегда должна рассматриваться как впадина
27	Неровность профиля	Выступ профиля и сопряженная с ним впадина профиля
28	Направление неровностей поверхности	Условный рисунок, образованный нормальными проекциями экстремальных точек неровностей поверхности на среднюю поверхность
29	Шероховатость поверхности	Совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная, например, с помощью базовой длины
30	Линия выступов профиля	Линия, эквидистантная средней линии, проходящая через высшую точку профиля в пределах базовой длины

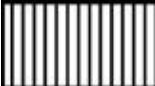
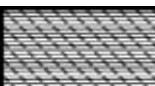


Ниже приведены способы количественной оценки шероховатости и соответствующие технические средства.

Требования к технике измерения шероховатости поверхности машиностроительных деталей изложены в ГОСТ 2789-73. Они устанавливаются исходя из функционального назначения поверхности для обеспечения заданного качества изделий.

Типы направлений неровностей поверхности выбираются из табл. 8.

**Таблица 8. Типы моделей неровностей**

Типы направлений неровностей	Схематическое изображение	Ориентация относительно линии, изображающей поверхность
Параллельное		Параллельно линии
Перпендикулярное		Перпендикулярно
Перекрещивающееся		Перекрещивание в двух направлениях наклонно к линии поверхности
Произвольное		Различные направления по отношению к линии поверхности
Кругообразное		Приблизительно кругообразно по отношению к центру поверхности
Радиальное		Приблизительно радиально по отношению к центру поверхности

Требования к шероховатости поверхности устанавливаются из перечня значений выбранных параметров и базовых длин, на которых происходит определение параметров шероховатости.

Параметры шероховатости выбираются из номенклатуры:

- $Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля;
- $Rz$  – высота неровностей профиля по десяти точкам;
- $R_{max}$  – наибольшая высота профиля;
- $S_m$  – средний шаг неровностей;
- $S$  – средний шаг местных выступов профиля;
- $t_p$  – относительная опорная длина профиля
- $p$  – значение уровня сечения профиля.

Параметр  $Ra$  является предпочтительным.

Если параметры  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rmax$  определены на базовой длине в соответствии с табл. 9, 10, то эти базовые длины не указываются в требованиях к шероховатости.

**Таблица 9. Соотношение значения параметра  $Ra$  и базовой длины**

$Ra$ , мкм	$l$ , мм
До 0,025	0,08
Свыше 0,025 до 0,4	0,25
- " - 0,4 до 3,2	0,8
- " - 3,2 до 12,5	2,5
- " - 12,5 до 100	8,0

**Таблица 10. Соотношение значения параметра  $Rz$ ,  $Rmax$  и базовой длины**

$Rz = Rmax$ , мкм	$l$ , мм
До 0,10	0,08
Свыше 0,10 до 1,6	0,25
- " - 1,6 до 12,5	0,8
- " - 12,5 до 50	2,5
- " - 50 до 400	8,0

При необходимости дополнительно к параметрам шероховатости поверхности устанавливаются требования к направлению неровностей поверхности, к способу или последовательности способов обработки поверхности.

Данные из табл. 11–13 используются для указания наибольших и наименьших допускаемых значений, границ параметров шероховатости.

**Таблица 11. Среднее арифметическое отклонение профиля  $Ra$ , мкм**

<u>100</u>	10,0	1,00	<u>0,100</u>	0,010
80	8,0	<u>0,80</u>	0,080	0,008
63	<u>6,3</u>	0,63	0,063	—
50	5,0	0,50	<u>0,050</u>	—
40	4,0	<u>0,40</u>	0,040	—
32	<u>3,2</u>	0,32	0,032	—
<u>25</u>	2,5	0,25	<u>0,025</u>	—
20	2,0	<u>0,20</u>	0,020	—
16,0	<u>1,60</u>	0,160	0,016	—
<u>12,5</u>	1,25	0,125	<u>0,012</u>	—

*Примечание.* Предпочтительные значения параметров подчеркнуты

Средний шаг неровностей  $S_m$  и по вершинам  $S$  должен соответствовать данным табл. 12, 13.

Относительная опорная длина профиля  $t_p$ : 10; 15%; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 %.

**Таблица 12. Средний шаг неровностей  $S_m$ , мкм**

—	1000	<u>100</u>	10,0	1,00	<u>0,100</u>
—	800	80	8,0	<u>0,80</u>	0,080
—	630	63	<u>6,3</u>	0,63	0,063
—	500	<u>50</u>	5,0	0,50	<u>0,050</u>
—	<u>400</u>	40	4,0	<u>0,40</u>	0,040
—	320	32	<u>3,2</u>	0,32	0,032
—	250	<u>25,0</u>	2,5	0,25	<u>0,025</u>
—	<u>200</u>	20,0	2,0	<u>0,20</u>	—
1600	160	16,0	<u>1,60</u>	0,160	—
1250	125	<u>12,5</u>	1,25	0,125	—

*Примечание.* Предпочтительные значения параметров подчеркнуты

**Таблица 13. Средний шаг неровностей по вершинам  $S$ , мкм**

—	10,0	1,00	0,100	0,010
—	8,0	0,80	0,080	0,008
—	6,3	0,63	0,063	0,006
—	5,0	0,50	0,050	0,005
—	4,0	0,40	0,040	0,004
—	3,2	0,32	0,032	0,003
—	2,5	0,25	0,025	0,002
—	2,0	0,20	0,020	—
—	1,60	0,160	0,0160	—
12,5	1,25	0,125	0,0125	—

Числовые значения уровня сечения профиля  $p$  выбираются из ряда 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90 % от  $R_{max}$ .

Числовые значения базовой длины  $l$  выбираются из ряда 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,80; 2,5; 8; 25 мм.

Для номинальных числовых значений параметров шероховатости должны устанавливаться допустимые предельные отклонения. Допустимые предельные отклонения средних значений параметров шероховатости в процентах от номинальных следует выбирать из ряда 10; 20; 40. Отклонения могут быть односторонними и симметричными.

Требования к шероховатости поверхности не включают требований к дефектам поверхности, поэтому при контроле шероховатости поверхности влияние дефектов поверхности должно быть исключено, а при необходимости – установлено отдельно.

Допускается устанавливать требования к шероховатости отдельных участков поверхности, например, участкам, заключенным

между порами крупнопористого материала, к участкам поверхности срезов, имеющим существенно отличающиеся неровности.

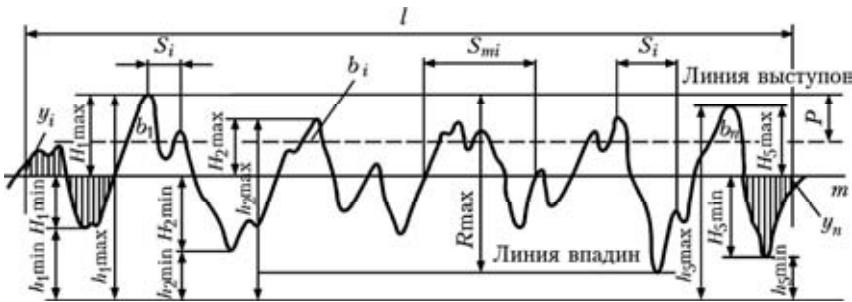


Рис. 3. Основные обозначения шероховатости

Требования к шероховатости поверхности отдельных участков одной поверхности могут быть различными. Высота неровностей профиля по десяти точкам  $Rz$  и наибольшая высота неровностей профиля  $Rmax$  показаны на рис. 3.

Средства измерения шероховатости поверхности поверяются в соответствии с ГОСТ 8.296-78. Наиболее частые параметры шероховатости  $Rmax$  и  $Rz$  в диапазоне 0,025...1600 мкм оцениваются по эталонной табл. 14.

Образцы шероховатости поверхности, предназначенные для сравнения с поверхностями изделий, обрабатываются резанием, полированием, электроэррозионной, дробе- и пескоструйной обработкой. Этому вопросу посвящены стандарты:

ГОСТ 2.601-95. Единая система конструкторской документации. Эксплуатационные документы.

ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

ГОСТ 13762-86. Средства измерений и контроля линейных и угловых размеров. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение.

МИ 1850-88. Государственная система обеспечения единства измерений. Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Методика поверки.

*Образец шероховатости поверхности* – это образец поверхности с известными параметрами шероховатости, полученной определенным механическим способом обработки.

**Таблица 14. Параметры образцовых средств шероховатости трех разрядов**

ЭТАЛОННЫ		<b>ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СПЕЦИАЛЬНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ШЕРОХОВАТОСТИ <math>R_{\max}</math> и <math>R_z</math></b> $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; S = 0,005 \text{ мкм}; \theta = 0,005 \text{ мкм}$ $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1000 \text{ мкм}; S = 0,05 \text{ мкм}; \theta = 0,005 \text{ мкм}$				
			Метод прямых измерений			
			Рабочие эталоны $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; S_0 = 0,8 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; S_0 = 0,1 \%$			
				Сличение при помощи компаратора	Метод прямых измерений	
	Образцовые ср-ва измер. 1-го разряда	Образцовые меры шероховатости $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 3 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 0,3 \%$		Образцовые приборы $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 3 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 0,3 \%$		
			Метод прямых измерений		Метод прямых измерений	
		Образцовые приборы $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 5 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 1 \%$		Образцовые меры шероховатости $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 5 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 1 \%$		
					Метод прямых измерений	
	Образцовые ср-ва измер. 2-го разряда	Образцовые меры шероховатости $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 8 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 3 \%$		Образцовые приборы $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 8 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 3 \%$		
			Метод прямых измерений		Метод прямых измерений	
		Образцовые меры шероховатости $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 1 \text{ мкм}; \delta = 8 \%$ $R_{\max}, R_z = 1 \dots 1000 \text{ мкм}; \delta = 3 \%$				
	Образцовые ср-ва измер. 3-го разряда	Микроинтеграторы $R_{\max}, R_z = 0,1 \dots 10 \text{ мкм}$ $\Delta = 22 \%$	Растровые измерительные микроскопы, приборы светового и теневого сечений $R_{\max}, R_z = 0,4 \dots 1600 \text{ мкм}$ $\Delta = 24 \%$	Контактные профилографы-профилометры $R_{\max}, R_z = 0,025 \dots 250 \text{ мкм}$ $\Delta = 4 \%$	Образцы шероховатости поверхности (сравнения) $R_z = 0,1 \dots 630 \text{ мкм}$ $\Delta = 50 \%$	Детали-образцы шероховатости поверхности (сравнения) $R_z = 0,05 \dots 1600 \text{ мкм}$ $\Delta = 50 \%$

Ряды номинальных значений параметра шероховатости  $R_a$  поверхности образца в зависимости от воспроизводимого способа обработки и базовые длины для оценки шероховатости должны соответствовать указанным в табл. 15.

Средний шаг неровностей поверхности образца не должен превышать  $1/3$  базовой длины. Приведенный в таблице ряд значений параметра  $R_a$  – предпочтительный. Допускается изготовление образцов с другими значениями параметра  $R_a$  по ГОСТ 2789 с градацией не

менее 2. Малые значения параметра  $Ra$  (до 0,1 мкм) приведены, в основном, не для сравнения с поверхностями контролируемых деталей, а для того, чтобы дать представление о различиях между этими значениями (например, 0,006; 0,0125; 0,025; 0,05 и 0,1 мкм), которые могут быть отмечены визуально.

**Таблица 15. Ряды номинальных параметров шероховатостей**

Способ обработки	Параметр шероховатости $Ra$ , мкм	Базовая длина $l$ , мм
Шлифование	0,05; 0,10; 0,20; 0,40; 0,80; 1,60; 3,20	0,25; 0,25; 0,25; 0,80; 0,80; 0,80; 2,50
Точение и расточка	0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5	0,8; 0,8; 0,8; 2,5; 2,5; 2,5
Фрезерование	0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5	0,8; 0,8; 2,5; 2,5; 8,0; 8,0
Строгание	0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5; 25,0	0,8; 0,8; 2,5; 2,5; 8,0; 8,0
Электроэрозионная обработка	0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5	0,8; 0,8; 0,8; 2,5; 2,5; 2,5
Дробе- и пескоструйная обработка	0,2; 0,4; 0,8; 1,6; 3,2; 6,3; 12,5; 25,0	0,8; 0,8; 0,8; 0,8; 2,5; 2,5; 2,5; 2,5
Полирование	0,006; 0,0125; 0,025; 0,050; 0,100; 0,200	0,08; 0,08; 0,08; 0,25; 0,25; 0,80

Поверхность образца оценивается параметрами шероховатости  $Rz$ ,  $Rmax$ ,  $S_m$ ,  $S$ ,  $t_p$ , значения которых приводятся как справочные по результатам измерений.

Образцы могут изготавливаться не только механическим, но и гальванопластическим методом позитивных отпечатков с матриц, например, выполненных из пласти массы или других материалов и воспроизводящих на вид поверхности.

В условном обозначении образца (или набора образцов) указывают:

- номинальное значение (или интервал значений для набора) параметра шероховатости  $Ra$ ;

- условное обозначение способа обработки;
- обозначение стандарта ГОСТ 9378-93.

Допускаемое отклонение среднего значения параметра  $Ra$  от номинального и допускаемое среднее квадратическое отклонение от среднего значения  $Ra$  должны соответствовать указанным в табл. 16.

Допускаемое среднее квадратическое отклонение указано для длины оценки, содержащей пять базовых длин. Для другого количества  $n$  базовых длин в длине оценки отклонение  $\sigma_n$  определяют по формуле

$$\sigma_n = \sigma \sqrt{5/n}$$

**Таблица 16. Допускаемое среднее квадратическое отклонение  $Ra$** 

Способ обработки	Допускаемое отклонение среднего значения $Ra$ от номинального, %	Допускаемое среднее квадратическое отклонение $\sigma$ , %
Шлифование	+12 -17	9
Точение		4
Расточка		4
Фрезерование		9
Строгание		3
Электроэррозионная обработка		12
Песко- и дробеструйная обработка		12
Полирование		12

Основное направление неровностей должно быть параллельно более короткой стороне образца. Образцы должны быть размагничены.

В соответствии с Межгосударственным стандартом ГОСТ 19300-86 установлены средства измерений шероховатости поверхности профильным методом. Приведем типы и основные параметры профилографов-профилометров контактных.

В зависимости от числовых значений параметров нормируемых метрологических характеристик устанавливают две степени точности профилографов-профилометров: 1 и 2.

Максимальные значения статического измерительного усилия и постоянной изменения измерительного усилия следует выбирать в зависимости от радиуса щупа. Они не должны превышать значений, указанных в табл. 17

Параметр шероховатости  $Rz$  рабочей поверхности опоры не должен превышать 0,1 мкм; усилие воздействия опоры датчика на контролируемую поверхность – 0,5 Н.

**Таблица 17. Значения усилий, прилагаемых к щупу шероховатости**

Номинальное значение радиуса кривизны вершины щупа, мм	Максимальное значение статического измерительного усилия, Н	Максимальное значение постоянной изменения измерительного усилия, Н/м
0,002	0,0007	35
0,005	0,004	200
0,010		

## VIII. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

### 1. Основные понятия

Электромагнитные волны – это возмущения электромагнитного поля, распространяющиеся в пространстве со скоростью  $c \approx 3 \cdot 10^{10}$  см/с.

Характерной особенностью электромагнитного излучения является корпускулярно-волновой дуализм.

Корпускулярные свойства фотона описываются его массой  $m = \varepsilon/c^2$  и импульсом  $p = \varepsilon/c$ .

Волновые свойства фотона характеризуются частотой  $\nu$  и длиной волн  $\lambda$  (в вакууме  $\lambda = c/\nu$ ).

Фотон – это квант поля электромагнитного излучения. Элементарная частица, обладающая нулевой массой покоя, энергией  $\varepsilon = h\nu$ , где  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – квант действия (постоянная Планка);  $\nu$  – частота излучения (Гц) со скоростью, равной  $c$ , участвующая только в электромагнитных взаимодействиях.

Оптическое излучение – электромагнитное излучение, характеризующееся длинами волн в диапазоне  $10^{-9} \dots 10^{-3}$  м.

В состав оптического излучения входят: видимое, ультрафиолетовое и инфракрасное излучения.

Видимое излучение (свет) – излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение. Видимое излучение характеризуется длинами волн, расположенными в диапазоне  $(4 \dots 7,6) \cdot 10^{-7}$  м.

Границы спектральной области видимого излучения условны. Нижняя границы считается обычно лежащей между 380 и 400 нм, верхняя – между 760 и 780 нм.

Ультрафиолетовое излучение – оптическое излучение, длины волн монохроматических составляющих которого лежат в пределах от  $10^{-9}$  до  $4 \cdot 10^{-7}$  м.

Инфракрасное излучение – оптическое излучение, характеризующееся длинами волн, расположенными в диапазоне  $7,6 \cdot 10^{-7} \dots 10^{-3}$  м.

*Монохроматическое излучение* – излучение, характеризующееся одним значением частоты. В более широком смысле это совокупность фотонов, обладающих практически одинаковой частотой или длиной волны.

*Сложное излучение* – излучение, состоящее из совокупности монохроматических излучений разных частот.

*Непрерывное оптическое излучение* – оптическое излучение, существующее почти в любой момент времени.

*Импульсное оптическое излучение* – оптическое излучение, существующее в интервале времени  $t$ , меньшем времени наблюдения.

Для обозначения фотометрических величин разных видов установлены подстрочные индексы: обозначения энергетических величин снабжаются индексом  $e$ , фотонных – индексом  $p$ , световых – индексом  $v$ .

*Энергия излучения*  $Q_e$  – энергия, переносимая излучением. Эта энергия, как и любая другая, имеет размерность, выражаемую в джоулях ( $[Q_e] = 1 \text{ Дж}$ ).

*Поток излучения*  $\Phi_e$  – мощность излучения, определяемая отношением переносимой энергии к времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний:

$$\Phi_e = \Delta Q_e / \Delta t,$$

где размерность и единица потока излучения  $[\Phi_e] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}$ .



В книге [1] приведены основные понятия физической оптики, используемые в визуальном контроле.

*Сила излучения*  $I_e$  – величина, определяемая отношением потока излучения  $d\Phi_e$ , распространяющегося от источника излучения внутри малого телесного угла  $d\Omega$  к этому телесному углу (рис. 4):

$$I_e = d\Phi_e / d\Omega.$$

Рис. 4. К определению понятия «пространственная облученность»

Размерность и единица силы излучения:

$$I_e = L^2 M T^{-3}, \quad [I_e] = 1 \text{ Вт/ср.},$$

где  $M$  – размерность массы;  $T$  – размерность времени.

Мерой телесного угла  $d\Omega$  с вершиной в центре сферы радиуса  $r$  является отношение площади сферической поверхности  $dA$ , на которую он опирается, к квадрату радиуса сферы, т.е.  $d\Omega = dA/r^2$ .

Единицей телесного угла – стерадиан (ср) – принят телесный угол, вырезающий участок сферы, площадь которого равна квадрату ее радиуса. Таким образом, Вт/ср (ватт на стерадиан) равен сумме излучения точечного источника, излучающего в телесном угле 1 ср поток излучения 1 Вт. *Точечным источником* излучения называют источник, размеры которого настолько малы по сравнению с расстоянием от него до приемника излучения, что им можно пренебречь при расчетах.

## 2. Световые величины

*Сила света*  $J$  – основная величина в системе величин, на которой построена Международная система единиц. Сила света характеризует свечение источника видимого излучения в некотором направлении [1].

Размерность и единица силы света следующие:

$$[J_v] = 1 \text{ кд} \text{ (кандела).}$$

*Кандела* – это сила света в данном направлении от источника, испускающего монохроматическое излучение частотой  $540 \cdot 10^{12}$  Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет 1,683 Вт/ср.

*Световой поток*  $d\Phi_v$  источника силой света  $J_v$  в элементарном телесном угле  $d\Omega$  составляет:

$$d\Phi_v = J_v d\Omega.$$

Размерность и единица светового потока:

$$[\Phi_v] = 1 \text{ кд} \cdot \text{рад} = 1 \text{ лм.}$$

Эта единица называется люмен. Люмен равен световому потоку, испускаемому точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд.

*Световая энергия*  $Q_v$  – физическая величина, определяемая интегралом светового потока по времени:

$$Q_v = \int \Phi_v dt.$$

При постоянном световом потоке:

$$Q_v = \Phi_v \Delta t.$$

Размерность и единица световой энергии:

$$[Q_v] = 1 \text{ лм} \cdot \text{с.}$$

Световая энергия может быть определена также как любая ре-дуплированная световая величина по отношению:

$$Q_v = K_m \int_0^{\infty} Q_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda.$$

Считается, что для всех длин волн  $K_m = 683 \text{ лм/Вт}$ ;  $V(\lambda)$  – отношение энергии излучения, взятой в бесконечном малом спектральном интервале  $d\lambda$ , содержащем данную длину волны  $\lambda$ , к ширине этого интервала.

Практически установлено, что при длине волны  $\lambda = 555 \text{ нм}$  монохроматический лучистый поток 1 Вт эквивалентен монохроматическому световому (желто-зеленого цвета) 683 лм.

*Яркость*  $L_v$  в точке поверхности и в данном направлении – отношение силы света  $dJ_v$  элемента поверхности к площади  $dA$  ортогональной проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную данному направлению:

$$L_v = dJ_v / dA.$$

Размерность и единица яркости:

$$[L_v] = 1 \text{ кд/м}^2.$$

Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  при силе света 1 кд (ранее эта единица яркости называлась нит).

*Светимость*  $M_v$  в точке поверхности – отношение светового потока  $d\Phi_v$ , исходящего от элемента поверхности, к площади  $dA$  этого элемента.

Размерность и единица светимости:

$$[M_v] = 1 \text{ лм}/\text{м}^2.$$

*Освещенность*  $E_v$  в точке поверхности – величина, равная отношению светового потока  $d\Phi_v$ , падающего на элемент поверхности, к площади  $dA$  этого элемента.

$$E_v = d\Phi_v / dA.$$

Размерность и единица освещенности:

$$[E_v] = 1 \text{ лм}/\text{м}^2 = 1 \text{ лк}.$$

Эта единица освещенности называется люкс. Люкс равен освещенности поверхности площадью  $1 \text{ м}^2$  при падающем на нее световом потоке  $1 \text{ лм}$ .

*Освещивание*  $\Theta_v$  – величина, определяемая интегралом силы света по времени:

$$\Theta_v = \int J_v dt.$$

При постоянной силе света:

$$\Theta_v = J_v \Delta t.$$

Размерность и единица освещивания:

$$[\Theta_v] = 1 \text{ кд} \cdot \text{с}.$$

*Световая экспозиция*  $H_v$  – величина, определяемая интегралом освещенности по времени:

$$H_v = \int E_v dt.$$

При постоянной освещенности:

$$H_v = E_v \Delta t.$$

Размерность и единица экспозиции:

$$[H_v] = 1 \text{ лк} \cdot \text{с}.$$

Световая экспозиция может быть также определена как отношение световой энергии  $dQ_v$ , падающей на рассматриваемый участок поверхности, к площади  $dA$  этого участка:

$$H_v = dQ_v / dA.$$

*Поляризация света* – упорядочение в ориентации векторов напряженностей электрического  $\bar{E}$  и магнитного  $\bar{H}$  полей световой волны в плоскости, перпендикулярной световому пучку.

Естественный свет (неполяризованный свет) представляет собой оптическое излучение с быстро и беспорядочно изменяющимися направлениями напряженности электромагнитного поля, причем все направления колебаний, перпендикулярные световым пучкам, равноправны.

Полностью поляризованный свет – это свет, у которого две взаимно перпендикулярные компоненты  $E_x$  и  $E_y$  электрического вектора  $\bar{E}$  совершают колебания с постоянной по времени разностью фаз.

*Фаза колебаний* – величина, функцией которой является состояние колебательного (волнового) процесса в каждый момент времени, измеряемая в угловых единицах.

Степень поляризации  $P$  – отношение интенсивности поляризованной составляющей оптического излучения к полной его интенсивности.

*Интерференция волн* – явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух (или нескольких) волн с одинаковыми периодами.

Для интерференции света необходима когерентность световых пучков.

*Когерентные волны* – волны одной частоты, колебания в которых отличаются постоянной разностью фаз.

Излучение двух различных источников оптического диапазона некогерентны и интерференционной картины не дают. Поэтому для получения интерференции света необходимы особые приемы. Так, в большинстве интерференционных устройств интерферирующие пучки получают расщеплением одного первоначального узкого пучка.

Интерференционные явления описываются формулами, которые связывают между собой расстояние (толщины), углы, длину волны и

показатель преломления. Интерференционные испытания позволяют определять одну из этих величин по остальным. Используя это явление, можно проверить качество изделий (например, совпадение поверхности изделия с заданным шаблоном по интерференционной картине в тонком слое-зазоре между изделием и шаблоном).

*Дифракция света* – явление, наблюдающееся при распространении света мимо резких краев непрозрачных или прозрачных тел, сквозь узкие отверстия и вообще в среде с резкими неоднородностями и связанные с нарушениями прямолинейности распространения света, т.е. с отклонениями от законов геометрической оптики. Дифракция свойственна всякому волновому движению, поэтому открытие или объяснение дифракции света явились одним из основных доказательств волновой природы света.

Дифракция света существенно влияет на рассеяние света в мутных средах и определяет предел разрешающей способности оптических приборов, например, микроскопов.

*Оптической длиной пути* называют произведение показателя преломления  $n$  на геометрическую длину  $l$ . Два пути световых волн, имеющих одинаковые оптические длины, называются *таутохромными*, так как их свет проходит за одно и то же время.

*Абсолютным показателем преломления* называют отношение скорости света в вакууме к фазовой скорости света в данной среде; *относительным* – отношение скорости света в среде II к скорости света в среде I.

Показатель преломления  $n$  связан с диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостями выражением  $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ . Длина волны  $\lambda$  в среде, показатель преломления которой равен  $n$ , описывается выражением  $\lambda = \frac{c}{vn}$ .

Значение показателя преломления для твердых тел изменяется от 1,3 до 4,0, для жидкостей – от 1,2 до 1,9.

*Преломление света* – это изменение направления распространения световой волны в неоднородной среде.

Для плоской протяженной границы раздела направление распространения преломленной волны определяется следующими законами:

1) преломленный луч находится в плоскости падения (плоскость, проходящая через падающий луч и нормаль к границе раздела);

2) углы падения и преломления,  $\varphi$  и  $\chi$  связаны законом Снеллиуса–Декарта:  $n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \chi$ , где  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сред.

Явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины волны света  $n = f(\lambda)$ , называются *дисперсией*. Для всех прозрачных веществ  $n$  монотонно возрастает с уменьшением  $\lambda$ , т.е. фиолетовые лучи преломляются (например, призмой) сильнее красных, что соответствует нормальной дисперсии.

*Информационная емкость оптических сигналов.* Минимальные размеры элементарного участка оптического изображения, еще способного нести информацию, определяется длиной волны  $\lambda$  световых колебаний. Площадь такого элементарного участка пропорциональна  $\lambda^2$ .

### 3. Оптические характеристики материалов

Материалы, имеющие свойства отражения, пропускания, поглощения, изменения характеристик и генерирования света, называются *светотехническими*. Их используют для изготовления отражателей, рассеивателей, защитных стекол, различных оптических деталей, светофильтров, электрических источников света, фотодетекторов и т.д.

Световой поток, падающий на поверхность материала, может быть отражен, поглощен или пропущен материалом.

Распределение общего светового потока по составляющим зависит от спектрального состава падающего света и свойств самого материала.

Для количественной характеристики [1] светотехнических свойств материала вводятся коэффициенты: отражения –  $\rho$ , поглощения –  $\alpha$ , пропускания –  $\tau$ . Они определяются следующими соотношениями:

$$\rho = \Phi_{v\rho}/\Phi_v; \alpha = \Phi_{v\alpha}/\Phi_v; \tau = \Phi_{v\tau}/\Phi_v,$$

где  $\Phi_v$  – падающий световой поток;  $\Phi_{v\rho}$ ,  $\Phi_{v\alpha}$ ,  $\Phi_{v\tau}$  – соответственно отраженный, поглощенный и пропущенный световые потоки. Определенные таким образом коэффициенты  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$  являются усредненными величинами, характеризующими взаимодействие материала с излучением во всем видимом диапазоне оптического спектра.

Большинство светотехнических материалов по разному воздействуют на излучение различных длин волн и наряду с пространственным перераспределением светового потока изменяют его спектральный состав. Поэтому для характеристики взаимодействия материала с монохроматическим излучением (излучением одной длины вводятся соответствующие спектральные коэффициенты: отражения –  $\rho_\lambda$ , поглощения –  $\alpha_\lambda$ , пропускания –  $\tau_\lambda$ ). Изменение этих коэффициентов в зависимости от длины волны излучения графически обычно изображается спектральными кривыми, т.е. зависимостями вида

$$\rho_\lambda = f(\lambda); \alpha_\lambda = \varphi(\lambda); \tau_\lambda = R(\lambda).$$

Важнейшие светотехнические характеристики.

1. *Нормальный показатель преломления*  $n_D$  для излучения с длиной волны 589 нм.

2. *Степень рассеяния*  $\gamma$  (для светопропускающих материалов):

$$\gamma = J_{40}/J_0,$$

где  $J_{40}$  и  $J_0$  – сила света от светового пятна на образце в проходящем свете под углами  $40^\circ$  и  $0$  к нормали поверхности образца.

3. *Коэффициент рассеяния*  $\delta$  (для светоотражающих материалов):

$$\delta = (L_{20} + L_{70})/(2L_5),$$

где  $L_5$ ,  $L_{20}$ ,  $L_{70}$  – яркость светового пятна на образце соответственно под углами  $5$ ,  $20$  и  $70^\circ$  к нормали при падении светового пучка перпендикулярно поверхности.

4. *Продольная кривая (индикатор) рассеяния*  $i_e$  ( $e$ ) *светового потока*, пропущенного или отраженного материалом. Эта кривая получается при пересечении фотометрического тела рассеяния плоскостью, проходящей через нормаль и максимальный радиус-вектор силы света.

5. *Показатель белизны*  $W$  – величина численно характеризующая близость отражающих свойств измеряемого образца к идеально белой поверхности применительно к оценке стандартным наблюдателем

6. *Цвет и цветность материала* используется наряду и с другими характеристиками: степень поляризации, оптическая плотность, световая отдача и др.

7. Различают следующие виды отражения: зеркальное, направленно-рассеянное, диффузное и смешанное. Распределение отраженного светового потока для этих случаев показано на рис. 5.

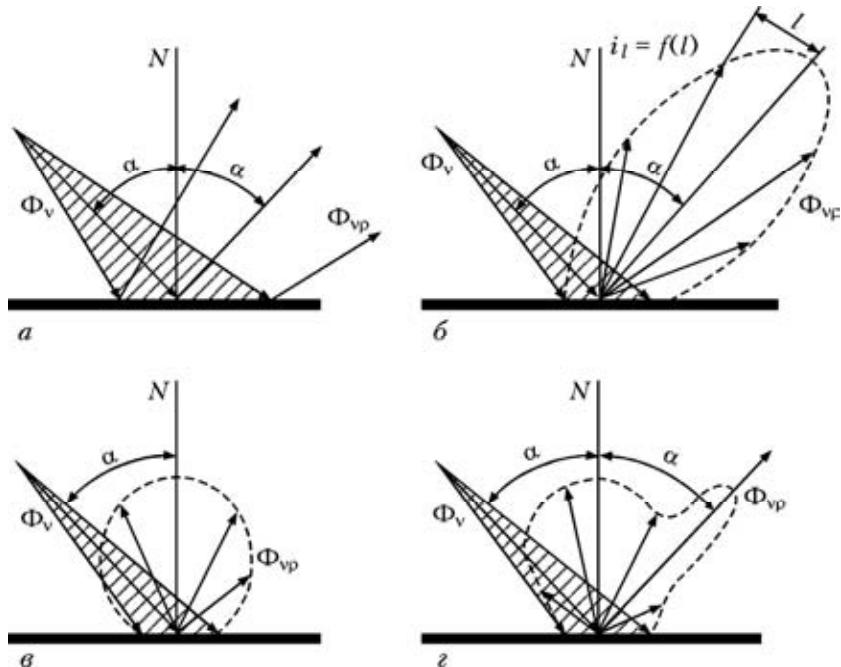


Рис. 5. Виды отражений светового потока:  
 а – направленное (зеркальное); б – направленно-рассеянное;  
 в – диффузное; г – смешанное

Характер отражения определяется структурой материала, состоянием его поверхности, типом поляризации падающего света и т.д. Простейший случай – отражение света от бесконечной плоской границы между двумя однородными средами. В этом случае направление распространения отраженной волны не зависит от вида сред:

- отраженный луч находится в плоскости падения;
- угол падения (угол между лучом падающей волны и нормалью) равен углу отражения (угол между лучом отраженной волны и нормалью).

При отражении от диэлектрика определяющим является соотношение показателей преломления диэлектрика и среды, из которой на диэлектрик падает световой луч, а также угол падения света.

Отражение света от металлов имеет свои особенности. Коэффициент отражения металла зависит от его электропроводности. Более высокий коэффициент отражения имеют металлы с хорошей электропроводностью: серебро, алюминий, золото и др. При отражении от металлов отсутствует поляризация света. Металлы в виде очень тонких пленок становятся прозрачными для света.

По характеру распределения пропущенного светового потока в пространстве можно выделить следующие виды пропускания: направленное, направленно-рассеянное, диффузное и смешанное. Распределение светового потока для этих случаев показано на рис. 6.

*Направленное пропускание* – это пропускание без рассеяния света. При этом телесный угол падающего светового потока равен телесному углу пропущенного материалом, если материал взят в виде плоской пластины (рис. 6,*a*). Перераспределение светового потока материалами с таким пропусканием возможно только за счет преломления света. Для этого на их поверхность наносят различной формы преломляющие элементы (призматические, сферические и др.).

*При направленно-рассеянном пропускании* пропущенный материалом световой поток распространяется преимущественно в направлениях, близких к направлению падающего луча; телесный угол пропущенного светового потока больше телесного угла падающего (рис. 6,*б*). Подобным пропусканием обладают матированные свето-пропускающие материалы. Если телесный угол пропущенного светового потока больше угла падающего и составляет в плоскости угол  $2\pi$ , то это пропускание называют *диффузным* (рис. 6,*в*).

Диффузное пропускание наблюдается у материалов с неоднородным внутренним строением. Свет, проходя через такую среду, претерпевает многократные преломления и отражения, в результате чего на выходе из материала он рассеян по всем направлениям. Продольной кривой рассеяния является окружность или близкая к ней кривая.

У материалов с неоднородной внутренней структурой и шероховатой поверхностью может наблюдаться *смешанное пропускание*. В этом случае наряду с диффузным рассеянием светового потока происходит его частичное пропускание (рис. 6,*г*).

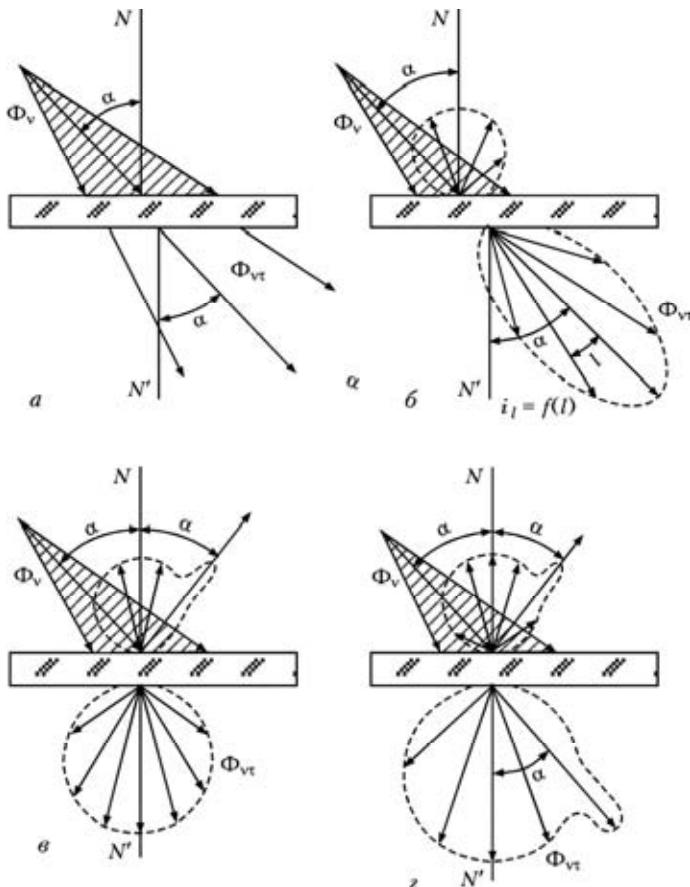


Рис. 6. Виды пропускания светового потока:  
 $a$  – направленное;  $b$  – направленно-рассеянное;  $c$  – диффузное;  
 $d$  – смешанное

#### 4. Метрология оптического излучения

Измеряют обычно светометрические (светотехнические) величины: ламп (источников излучения), световых приборов, осветительных установок, приемников, материалов [1, 3].

Основными светотехническими величинами [1], подлежащими измерению, обычно могут быть световой поток  $\Phi_v$ , освещенность  $E_v$ , яркость  $L_v$ , сила света  $J_v$ , а также производные от них.

Основой всех фотометрических способов измерения светотехнической величины  $X$  является оценка соответствующей спектральной энергетической величины  $X_{e,\lambda}$  согласно спектральной чувствительности  $V(\lambda)$  человеческого глаза к свету, так называемой относительной спектральной световой эффективности (степень видимости).

Любой фотометрический способ измерения характеризуется тем, что между результатом измерения  $Y$ , например, фототоком и измеряемой светотехнической величиной  $X$  имеет место известное и воспроизводимое соответствие

$$Y = f(X) = f(K_m) \int_0^X X_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda,$$

где  $K_m = 683$  лм/Вт;  $X_{e,\lambda}$  – спектральная энергетическая величина, соответствующая измеряемой величине.

В соответствии с этим уравнением какую-либо светотехническую величину можно оценить, если измерить соответствующую спектральную энергетическую фотометрическую величину в функции длины волны и по ней рассчитать светотехническую величину с использованием согласованных значений  $K_m$  и  $V(\lambda)$ . Это так называемый спектральный способ.

По приведенному выше уравнению любую светотехническую величину можно определить с использованием светочувствительного приемника, относительная спектральная чувствительность которого  $s(\lambda)_{\text{отн}}$  соответствует функции  $V(\lambda)$ . Это так называемый интегральный способ с приемниками  $V(\lambda)$ .

Любой светочувствительный приемник, используемый в фотометрии, способен непосредственно измерять только одну величину, например, глаз человека измеряет яркость, физические приемники – фототок или освещенность, фотопленки – экспозицию.

Световые измерения выполняют с помощью специальных приборов – фотометров, визуальных и физических фотоэлектрических, где в качестве приемника излучения используют соответственно или глаз, или какой-либо физический приемник.

Важнейшие характеристики светочувствительных приемников определяются следующими величинами: интегральной чувствительностью  $s$ , относительной спектральной чувствительностью  $s(\lambda)_{\text{отн}}$ , светочувствительной поверхностью  $A$ , темновым током  $I_0$ .

В фотометрии используют кремниевые элементы, фоторезисторы, фотодиоды, фототиристоры и т.п.

Для измерения освещенности применяют люксметры с диапазонами измерения от  $10^{-4}$  до  $10^5$  лк с суммарной погрешностью в зависимости от класса от 3 до 20 %.

Для измерения яркости используется зависимость между освещенностью  $E_\nu$  на светочувствительной поверхности приемника и распределением яркости  $L_\nu$ :

$$E_\nu = \int_{\Omega} L_\nu d\Omega \cos \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – угол падения света на приемник;  $\Omega$  – элементарный телесный угол.

При ограниченном телесном угле  $\Omega$ , в пределах которого свет падает на приемник, средняя яркость оценивается отношением  $\bar{L}_\nu = E_\nu / \Omega$ . Среднюю яркость  $\bar{L}_\nu$  в каком-либо направлении можно получить также и как отношение силы света  $J_\nu$  в данном направлении к площади светящейся поверхности, видимой в данном направлении  $A$ :

$$\bar{L}_\nu = J_\nu / A.$$

Существующие в настоящее время измерители яркости с углом обзора (измерительного поля)  $2\dots 3^\circ$  и более в зависимости от класса имеют суммарную погрешность 5...20 %.

Силу света оценивают путем измерения освещенности и расчетом по фотометрическому закону изменения освещенности с расстоянием или интегрированием распределения измеренной яркости.

Согласно указанному фотометрическому закону сила света по направлению на освещенный элемент поверхности описывается соотношением:

$$J_\nu = E_\nu r^2 \cos^{-1} \varepsilon \Omega_0^{-1},$$

где  $E_\nu$  – освещенность элемента поверхности;  $r$  – расстояние между источником света и освещенным элементом поверхности;  $\varepsilon$  – угол падения света на освещенный элемент поверхности;  $\Omega$  – телесный угол в один стерadian. Это соотношение справедливо с достаточ-

ной точностью только для расстояний  $r$ , превышающих предельно-допустимое расстояние фотометрирования.

Для круглого (дискового) источника света постоянной яркости предельное расстояние фотометрирования при допустимой погрешности 0,25 % составляет 10 диаметров светящейся поверхности.

*Измерение светового потока* оценивают путем учета распределения силы света или освещенности или измерением при помощи светомерного шара.

Для измерения цвета применяют в основном спектральный метод, при котором измеряемый цветовой показатель определяют как сумму цветовых стимулов по спектру.

Измерение складывается из спектрально-фотометрического определения функции цветового возбуждения  $\varphi_\lambda$  вещества, и из расчетной обработки измеренных значений. Хотя спектральный метод трудоемок, но он более точный.

## 5. Государственная система метрологии средств контроля

Основная задача государственной метрологической службы [7, 11] – обеспечение единства и достоверности измерений. Это достигается путем:

- создания комплекса нормативно-технических документов государственной системы обеспечения единства измерений;
- создания эталонной базы и комплекса образцовых средств измерений, находящихся в ведении органов отраслевых метрологических служб.

Нормативно-правовой основой метрологического обеспечения научной и практической деятельности является система государственных стандартов.

Нормативно-техническая, конструкторская и технологическая документация должна быть подвергнута метрологической экспертизе.

Под *проверкой средств измерений* понимают определение метрологическим органом погрешностей средств измерений и становление его пригодности к применению.

Иногда при поверке вместо определения значений погрешностей определяют, находятся ли они в допускаемых пределах.

*Первичная поверка* проводится при выпуске в обращение, ремонте и поступающих в эксплуатацию средств измерений.

*Периодическая поверка* проводится при эксплуатации и хранении через определенные межповерочные интервалы.

*Внеочередная поверка* проводится при эксплуатации (хранении) средств измерений вне зависимости от сроков периодической поверки если:

- необходимо удостовериться в исправности средств измерений;
- средства измерения устанавливаются в качестве комплектующих изделий после истечения половины межповерочного интервала на них;
- при повреждении поверительного клейма, пломбы или утрате аттестата и подобных случаях.

*Инспекционная поверка* проводится при осуществлении государственного надзора и ведомственного контроля.

*Экспертная поверка* проводится органами государственной метрологической службы в случае возникновения спорных вопросов.

*Юстировка* – это процесс выявления в измерительных средствах дефектов, их устранение, регулировка.

## **IX. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЗРЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВИЗУАЛЬНОМ ОБНАРУЖЕНИИ ДЕФЕКТОВ**

### **1. Строение глаза и его свойства**

Глаз человека имеет сложное строение (рис. 7). Снаружи глаз покрыт твердой фиброзной оболочкой, состоящей из двух частей – склеры 1 и роговицы 2. Склера – непрозрачная оболочка, защищающая внутренние части глаза от внешних воздействий. Толщина склеры – 0,4...1,1 мм. Передняя часть фиброзной оболочки – прозрачная, несколько изогнутая, называется роговицей [1, 2].

Под склерой находится сосудистая оболочка 3, состоящая из сети кровеносных сосудов, питающих глаз. Спереди сосудистая оболочка утолщается и переходит в ресничное тело 4 и радужную оболочку 5. В центре радужной оболочки находится отверстие (зрачок), выполняющее роль диафрагмы. Благодаря действию мышц радужной оболочки диаметр зрачка меняется от 2 до 8 мм.

За радужной оболочкой расположена хрусталик 6. Форма хрусталика под воздействием цилиарной мышцы изменяется, а тем самым изменяется оптическая сила глаза. За роговицей расположена передняя камера 7, наполненная водянистой влагой. Внутренность самого глазного яблока заполнена студенистым прозрачным веществом – стекловидным телом 8. К со-

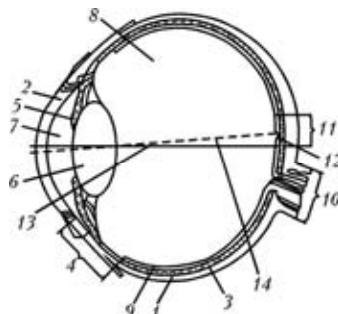


Рис. 7. Схематическое изображение разреза глаза человека:  
1 – скlera; 2 – роговица; 3 – сосудистая оболочка; 4 – ресничное тело;  
5 – радужная оболочка; 6 – хрусталик; 7 – передняя камера;  
8 – стекловидное тело; 9 – ретина; 10 – зрительный нерв;  
11 – желтое пятно; 12 – центральная ямка; 13 – оптическая ось;  
14 – зрительная ось

судистой оболочке, заполняющей внутреннюю полость склеры, прилегает сетчатая оболочка, или ретина 9; она состоит из десяти слоев. В ней расположены светочувствительные клетки, имеющие вид палочек и колбочек. Длина палочки – около 0,06 мм, колбочки – 0,035 мм. Число палочек в ретине около 130 млн, колбочек – 7 млн. Палочки и колбочки распределены неравномерно.

Место вхождения зрительного нерва 10 в глазное яблоко называется соском зрительного нерва. В этом месте нет ни палочек, ни колбочек, поэтому проекция его в поле зрения называется слепым пятном. Снаружи от соска зрительного нерва находится желтое пятно 11, заполненное преимущественно колбочками. В середине желтого пятна имеется углубление 12 – центральная ямка – диаметром около 0,5 мм, соответствующее пространственному углу обзора около  $1^0$ , в котором находятся только колбочки. Центр его совпадает со следом оптической оси 13 на сетчатке, т.е. с точкой заднего фокуса. Вследствие этого зрительная ось 14 (линия, по которой происходит наблюдение рассматриваемого предмета) не совпадает с оптической осью, а составляет с ней так называемый угол альфа ( $\alpha$ ), приблизительно равный  $5^0$ .

В центральной ямке каждая колбочка связана с головным мозгом непосредственно отдельным нервным волокном в отличие от остальных колбочек и палочек сетчатки. Имеется примерно один миллион различных волокон оптического нерва, которые передают от глаза информацию в мозг.

Зрение в темноте осуществляется с помощью палочек, а в окрестности желтого пятна палочек нет, поэтому в темноте предметы, находящиеся прямо перед нами, мы видим хуже, чем предметы, расположенные сбоку.

Интересно отметить тот факт, что периферия сетчатки исключительно чувствительная к движению объектов.

Оптическая система глаза состоит из роговицы, жидкости передней камеры, хрусталика и стекловидного тела. Сила или рефракция глаза зависит от величины радиусов кривизны преломляющих поверхностей, расстояний между ними и показателя преломления роговицы, хрусталика, водянистой среды и стекловидного тела. Все эти величины зависят от индивидуальных особенностей глаза.

Под рефракцией глаза понимается преломляющая способность его в состоянии покоя. Нормальная зрительная работоспособность глаза зависит от состояния светочувствительного и двигательного аппаратов. Зрительное утомление может наступить при расстрой-

стве функций одного или обоих аппаратов. Утомление двигательного аппарата глаза возникает вследствие необходимости часто переводить взгляд с одних предметов на неодинаково удаленные другие, следить за движущимися объектами и т.п.

При нормальной рефракции дальняя точка ясного зрения находится в бесконечности. Параллельные лучи после преломления в оптической системе глаза собираются в сетчатке.

В системе близорукого (или миопического) глаза параллельные лучи после преломления собираются впереди сетчатки, т.е. главный фокус  $F$  глаза не совпадает с поверхностью сетчатки и на ней получается кружок рассеяния. Это является следствием или большой преломляющей силы глаза или же чрезмерно большой длины оси глазного яблока. Для коррекции миопии необходима отрицательная рассеивающая линза.

Близорукость возникает также в тех случаях, когда человеку приходится длительное время напрягать зрение в неблагоприятных условиях (недостаточная освещенность, неудобное положение при зрительной работе и т.п.).

Главный фокус дальнозоркого (или гиперметропического) глаза находится за сетчаткой. Это обуславливается или слабой преломляющей силой глаза или же слишком малой длиной оси глазного яблока. Для коррекции гиперметропического глаза необходима положительная собирательная линза.

При астигматизме световые пучки вместо точки дадут изображение в виде двух линий.

Среди различных меридианов глаза различают два главных меридиана, перпендикулярных один к другому: один из них – с наибольшей рефракцией, другой – с наименьшей.

Если в одном меридиане (вертикальном) рефракция глаза эмметропическая, а в другом (горизонтальном) – миотропическая, то при рассматривании двух удаленных перпендикулярно перекрещающихся линий на сетчатке неаккомодированного глаза изображение вертикальной линии получится резким, а горизонтальной – в виде размытой полосы. Следовательно, надо корректировать эмметропию в одном меридиане, что и выполняют астигматические линзы.

Астигматизм глаза может быть обусловлен не только неправильной кривизной роговой оболочки, но и изменением в кривизне и в положении хрусталика.

Способность глаза приспосабливаться к четкому видению различно удаленных предметов называется аккомодацией глаза. Это

достигается изменением преломляющей силы хрусталика благодаря изменению радиусов кривизны его передней поверхности.

На рис. 8 показано положение хрусталика при аккомодации на точку  $R$ , называемой дальнейшей точкой ясного зрения, и под осью – аккомодированный хрусталик при рассматривании точки  $P$ , называемой ближайшей точкой ясного зрения. Расстояние между дальнейшей точкой –  $a_R$  и ближайшей точкой  $a_P$ , выраженное в диоптриях, называется объемом аккомодации.

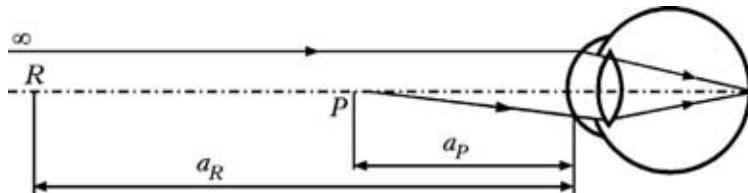


Рис. 8. Схема аккомодации глаза

При чтении книг или при рассматривании какого-либо предмета расстояние  $a_P$  устанавливается человеком инстинктивно такое, которое не требует очень сильного напряжения аккомодации, но в то же время достаточно мало, чтобы различать мелкий шрифт. Это расстояние вдвое больше расстояния до ближней точки глаза и в среднем принимается равным 250 мм или 4 дптр. С возрастом хрусталик теряет свою эластичность, ближайшая точка ясного зрения отодвигается от глаза и человек не в состоянии рассматривать предметы на слишком近距离. Это явление называется старческой дальнозоркостью или пресбиопией.

Изменение объема аккомодации с возрастом приводится в табл. 18.

**Таблица 18. Возрастные изменения объема аккомодации**

Воз- раст, годы	Ближайшая точка ясного зрения, мм	Объем аккомода- ции, дптр	Воз- раст, годы	Ближайшая точка ясного зрения, мм	Объем ак- комода- ции, дптр
10	71	14	45	310	3,25
15	83	12	50	400	2,5
20	100	10	55	500	1,75
25	125	8	60	2000	1,0
30	143	6,5	65	4000	0,5
35	175	5,75	70	1000	0,25
40	222	4,5	75	570	0

*Остротой зрения или разрешающей способностью* глаза называется способность глаза различать две точки раздельно.

В области ямки сетчатки колбочки расположены в виде гексагональной мозаики; расстояние между осями двух соседних колбочек примерно равно 2,8 нм.

Учитывая оптические характеристики глаза (переднее фокусное расстояние в среднем равно 16,7 мм) предел углового разрешения глаза можно оценить значением 0,17 мрад или 35''.

Раздельное изображение получается тогда, когда между двумя возбужденными светом колбочками находится одна промежуточная, не раздраженная светом. Способность глаза различать две точки с минимальным углом между ними в 1' считается нормой. Острота зрения (*visus*) такого глаза принимается равной 1,0. Для исследования остроты дальнего зрения пользуются таблицами Д.А.Сивцева с кольцами и буквами. Эти таблица построены по десятичной системе, они состоят из 12 строк; цифры остроты зрения указаны на каждой строке (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,5; 2,0). По этим таблицам исследования проводятся с расстояния 5 м независимо для каждого глаза. При изменении расстояния показания будут другие.

Поле зрения определяется пространством, наблюдаемым неподвижным глазом. Границы на белый цвет равны: вниз – 70°, вверх – 55°, к носу – 60° и к виску – 90° (125° по вертикали и 150° по горизонтали). Поле зрения обоих глаз – около 180°. Движение глаз позволяет увеличить угловую величину просматриваемого пространства (поле взора). Нормальными границами подвижности глаз принято считать: вниз – 53°, вверх – 37°, к носу – 46° и к виску – 44°.

Поле зрения одного глаза условно можно разделить на три зоны:

1) зона наиболее ясного зрения – центральная, с полем зрения около 2°;

2) зона ясного зрения, в которой различаются предметы без мелких деталей, с полем зрения около 30° по горизонтали и около 22° по вертикали;

3) зона периферического зрения, которая важна для ориентации, но детали предметов ясно не различаются.

Бинокулярное зрение обусловлено функцией обоих глаз соединять образы в одно зрительное восприятие, возникающее в коре головного мозга. Единое зрительное восприятие от обоих глаз возникает во время фиксации ими объекта, находящегося на том или ином расстоянии от наблюдателя.

При рассматривании удаленного предмета оптические оси обоих глаз параллельны, и глаза работают без аккомодации. Для рассматривания близких предметов оси обоих глаз должны пересекаться на рассматриваемом объекте. При этом глаза поворачиваются в своих орbitах и принимают нужное положение. Такое изменение положения осей называется *конвергенцией*. Угол, составляемый зрительными осями глаз, называется *углом конвергенции*. Величина угла зависит от положения объекта и расстояния между точками, вокруг которых врачаются глаза. Центр вращения глаз находится примерно на расстоянии 13 мм от вершины роговицы.

Поле зрения, видимое одновременно обоими глазами и называемое бинокулярным, составляет около  $120^0$ . Глазной базис (расстояние между осями глаз) для различных людей колеблется в пределах от 52 до 72 мм. Максимальный угол конвергирования –  $32^0$ .

Полноценное бинокулярное зрение не только обеспечивает слияние зрительных ощущений в двух измерениях (в плоскости), но и позволяет точнее, чем при зрении одним глазом, определить положение предметов в третьем измерении, называемом глубинным или стереоскопическим зрением.

## **2. Видимость объектов, контрастная чувствительность, разрешающая способность и острота зрения**

Для НК существенное значение [7] имеет видимость близко расположенных объектов, которая, помимо психофизиологических свойств зрения, зависит от продолжительности рассмотрения, а также от следующих основных факторов: контраста, яркости, цвета, условных размеров объекта, резкости его контура, условий освещения. Каждому из указанных свойств соответствует свой абсолютный порог, ниже которого предмет не может быть виден. Например, при *слишком малой яркости и очень малой контрастности предмет нельзя сделать видимым никаким увеличением угловых размеров или продолжительности рассматривания*.

Видимость близко расположенных предметов зависит также от:

- физического, психологического состояния оператора;
- монокулярности или бинокулярности зрения;
- условий работы (шум, вибрация, тепловое воздействие);
- адаптации глаза к объекту и характеру его освещения.

Восприятие изображения зависит от фона, на котором он находится. Наше восприятие характера изображения рисунков, формирование зрительного образа и зрительной иллюзии зависит от расположенных рядом рисунков, контуров и т.п. Например, на рис. 9 показано, что верхняя линия 1 кажется более длинной, чем нижняя; круг 2 на фоне треугольника кажется неправильным; горизонтальная линия 3 на фоне радиальных кажется не-параллельными. Белый круг 4, четко очерченный на фоне черного квадрата кажется большим, чем такой же круг 5 нечетко очерченный.

Наиболее важными условиями видимости считаются контраст и угловые размеры объекта. Под контрастом понимают свойство объекта выделяться на окружающем фоне благодаря различию их оптических свойств.

Способность глаза замечать различие нескольких одновременно видимых объектов называется *контрастной чувствительностью*. Контрасты, различимые дефектоскопистом, разделяют на яркостные и цветовые. В первом случае два излучения воспринимаются глазом как одинаковые по цветности, но разные по яркости, во втором различаются по цветности.

За меру яркостного контраста принимают отношение:

$$K = \frac{B_\phi - B_0}{B_\phi},$$

где  $B_0$  – яркость рассматриваемого объекта ( $\text{kд}/\text{м}^2$ );  $B_\phi$  – яркость окружающего фона ( $\text{kд}/\text{м}^2$ ). При  $K > 0,5$  – контраст считается большим;  $0,2 < K \leq 0,5$  – средним;  $K \leq 0,2$  – малым.

Наиболее отчетливое восприятие изображения возможно при максимальном контрасте между объектом и фоном. Максимального

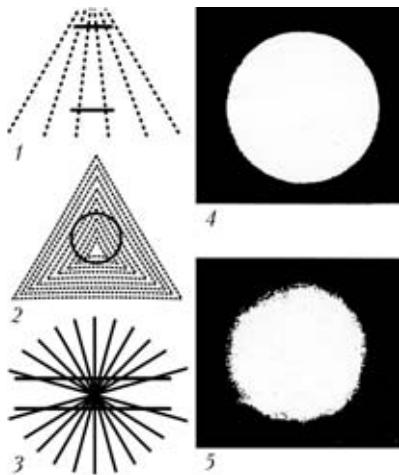


Рис. 9. Восприятие изображения в зависимости от фона

яркостного контраста можно достичнуть при использовании белого и черного цветов, которые имеют соответственно наибольший и наименьший коэффициенты отражения. При солнечном освещении коэффициент отражения составляет 65...80 % для белого и 3...10 % для черного цвета. Яркостный контраст 85...95%.

Сравнение величин контраста между черным и белым цветами и хроматическими (всеми остальными цветами спектра) показывает, что *наибольший контраст белый цвет образует с красным цветом, а черный с желтым цветом, чем объясняется применение именно такого сочетания цветов в капиллярном контроле: в цветном контроле это красные индикаторные следы на белом фоне проявителя; в люминесцентном – желто-зеленые индикации на черном фоне.*

В работе глаза существенную роль играет минимальная величина яркостного контраста, которую дефектоскопист еще способен различать. Эта предельно малая величина контраста называется *порогом контрастной чувствительности глаза* ( $K_{nop}$ ). Порог контрастной чувствительности для большинства людей составляет 0,01...0,02 (т.е. 1...2 %) при наблюдении в дневных условиях объектов с угловыми размерами не менее 0,5 градусов при оптимальных условиях осмотра. В реальных условиях  $K_{nop} \approx 0,05$  (5 %).

Отношение величины наблюдаемого контраста ( $K$ ) к величине порогового контраста ( $K_{nop}$ ) в данных условиях определяет *видимость объекта* ( $V$ ) – это степень различимости объектов при их наблюдении

$$V = \frac{K}{K_{nop}}.$$

Например, если  $K = 15...20$  %, а порог контраста  $K_{nop} = 5$  %, тогда видимость дефектов на поверхности деталей составляет 3...4.

Под *цветовым контрастом* понимают меру различия цветов по их цветовому тону, насыщенности и яркости. Контраст по цветовому тону ( $K_t$ ) характеризуется степенью различия цветов на цветовом круге Ньютона.

Контраст по насыщенности краски ( $K_M$ ) характеризует отношение разности величины насыщенности двух красок к большей насыщенности:

$$K_M = \frac{M_1 - M_2}{M_1},$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – насыщенность сравниваемых цветов  $M_1 > M_2$ .

При осмотре крупных цветных объектов оптимальные условия для работы глаза – при среднем цветовом контрасте между объектом и фоном. При поиске мелких дефектов на поверхности детали цветовой контраст между ними и поверхностью должен быть максимальным.

Значительная часть информации, которую можно получить от показаний, зависит от нашей способности различить ее «форму». Особенно это важно, когда необходимо отличить значимое показание пятна. Поэтому разрешающая способность глаза и острота зрения играют существенную роль в визуальном контроле.

Разрешающая способность характеризуется величиной минимального угла между контурами раздельно воспринимаемых объектов или числом раздельно видимых линий на  $1'$ . Способность глаза различать две точки с минимальным углом между ними в  $1'$  считается нормой.

Остроту зрения определяют величиной минимального углового размера объекта, воспринимаемого глазом при максимальном контрасте.

Для нормального глаза в оптимальных условиях осмотра острота зрения равна 2...4 минуты. При остроте зрения 2 минуты на расстоянии наилучшего зрения (250 мм) глаз может различать детали размером не менее 0,15 мм.

Острота зрения и разрешающая способность характеризуют возможность глаза видеть мелкие объекты.

Острота зрения и разрешающая способность глаза зависят от:

- освещенности объекта;
- индивидуальных особенностей глаза;
- продолжительности осмотра;
- спектральной характеристики объекта.

Каждая рассматриваемая точка вследствие дифракции и рассеяния света в глазных средах воспринимается глазом в той или иной степени не резко, в виде дифракционного кружка рассеяния.

*Дифракцией* называются огибание светом непрозрачных тел, выражающееся в отступлении от прямолинейного хода лучей. На рис. 10 показано, как выглядят на фотографиях дифракционные картины от различных препятствий. Дифракционный кружок при средней освещенности и средней длине волны 550 нм составляет 0,009 мм. Так как диаметр самых маленьких рецепторов-колбочек в центральной

ямке сетчатки составляет около 0,001 мм, то разрешающая способность глаза и острота зрения в таких условиях ограничиваются только дифракцией света.

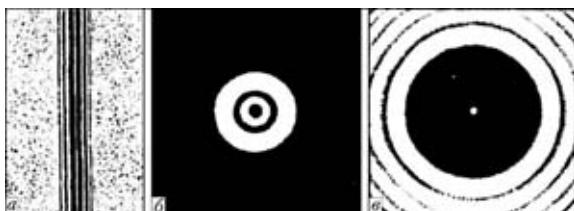


Рис. 10. Деформация изображения из-за дифракции:  
а – тонкой проволочки; б – круглого отверстия; в –  
круглого экрана

острота зрения снижается из-за погрешности (абберации) оптики глаза. При диаметре зрачка 2,5...3 мм острота зрения падает из-за дифракции света, что соответствует общей освещенности 2000...25000 лк.

Если свет представляет собой волновой процесс, то, кроме интерференции, должна наблюдаться и дифракция света. Ведь дифракция – огибание волнами краев препятствий – присуща любому волновому движению. Но наблюдать дифракцию света нелегко. Дело в том, что волны заметным образомгибают препятствия, размеры которых сравнимы с длиной волны, а длина световой волны очень мала. Пропуская тонкий пучок света через маленькое отверстие, можно наблюдать нарушение закона прямолинейного распространения света. Светлое пятно против отверстия будет большего размера, чем это следует ожидать при прямолинейном распространении света. В 1802 г. Юнг, открывший интерференцию света, поставил классический опыт по дифракции (рис. 11) [2]. В непрозрачной ширме он проколол булавкой два маленьких отверстия *B* и *C* на небольшом расстоянии друг от друга. Эти отверстия освещались узким световым пучком, прошедшим, в свою очередь, через малое отверстие *A* в другой ширме. Именно эта деталь, до которой очень трудно было додуматься в то время, решила успех опыта. Интерферируют только когерентные волны. Возникшая в соответствии с принципом Гюйгенса сферическая волна от отверстия *A* возбуждала в отверстиях *B* и *C* когерентные колебания. Вследствие дифракции из отверстий *B* и *C* выходили два световых конуса, которые частично перекрывались. В результате интерференции световых волн на экране по-

Наиболее высокая острота зрения наблюдается при диаметре зрачка глаза в 3...4 мм, что бывает при общей освещенности от 100 до 1000 лк.

При диаметре зрачка более 4 мм

являлись чередующиеся светлые и темные полосы. Закрывая одно из отверстий, Юнг обнаруживал, что интерференционные полосы исчезали. Именно с помощью этого опыта впервые Юнгом были измерены длины волн, соответствующие световым лучам разного цвета, причем весьма точно.

*Аберрацией (сферической)* называется пересечение преломленных глазом лучей в разных точках сетчатки.

*Аберрацией (хроматической)* называется неравномерное преломление различных по длине волны лучей спектра с фокусировкой каждого из них на отдельной плоскости. Наблюдаемое изображение имеет радужный ореол.

Минимальное расстояние между точками, воспринимаемыми глазом раздельно, определяется зависимостью:

$$R = l \sin \alpha,$$

где  $l$  – расстояние от глаза до плоскости точек;  $\alpha$  – минимальный разрешаемый угол поля зрения.

Для нормального глаза с разрешающей способностью 1 ( $\alpha = 1$  минута,  $l = 250$  мм) при хорошей освещенности расстояние между раздельно воспринимаемыми точками составляет около 0,075 мм. Приближенно эту величину принимают равной 0,1 мм (по ГОСТ 23479-79 «Методы оптического вида»).

На разрешающую способность и остроту зрения оказывает влияние *иррадиация*, которая заключается в кажущемся увеличении размеров светлых предметов на темном фоне. Чем светлее предмет, тем он кажется крупнее. Это явление при нормальном освещении повышает остроту зрения, однако, снижает разрешающую способность глаза. Мелкие светлые одиночные объекты, например, тонкая трещина при люминесцентном контроле из-за иррадиации легко об-

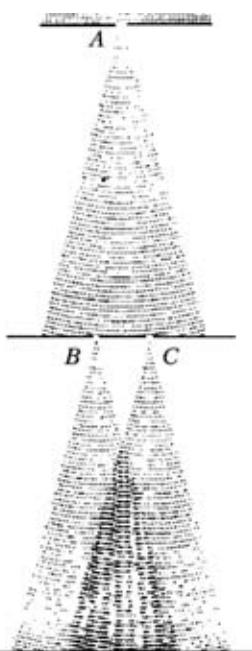


Рис. 11. Опыты Юнга, подтверждающие наличие дифракции света

наружить. Однако две близко расположенные линии могут быть восприняты как одна.

Острота зрения входит в обязательные параметры зрения дефектоскописта и контролируется ежегодно при медицинском осмотре.

### 3. Цветоощущение глаза человека

Если луч белого света пропускать через стеклянную призму, то он, преломляясь [1, 2], дает на экране удлиненное изображение с радужным чередованием цветов (рис. 12, цветная вклейка). Такая радужная полоска называется *спектром*, а явление расположения белого цвета на составляющие цветные лучи *дисперсией*.

Цвет окружающих нас тел значительно отличается от чистых спектральных цветов. Некоторые цвета, такие как черный, белый, различные оттенки серого, коричневого и пурпурного вообще не встречаются в спектре. Они являются смесью цветов.

Цвета делят на ахроматические (черный, белый, серые) и хроматические (все остальные цвета спектра).

Хроматические цвета отличаются цветовым тоном, яркостью (светлотой) и насыщенностью.

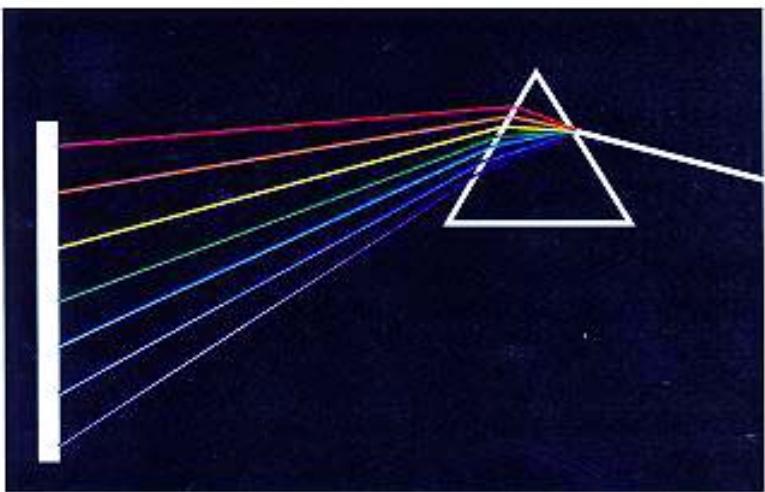
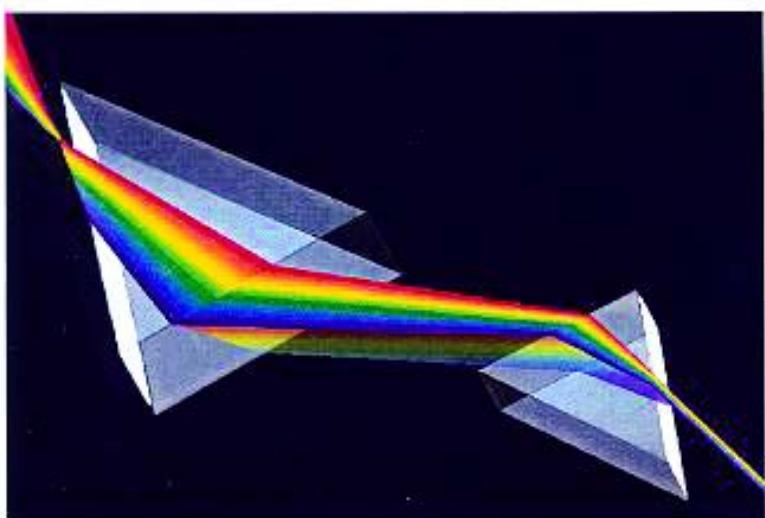
Под *насыщенностью* цвета понимают степень отличия данного цвета от одинакового по светлоте серого цвета.

При некотором повышении освещенности объекта, находящегося первоначально в полной темноте, он становится видимым. Наименьшее значение освещенности, создаваемой объектом на зрачке наблюдателя, при котором объект становится заметным, называется *цветовым порогом* ( $E = 10^{-6}$  лк).

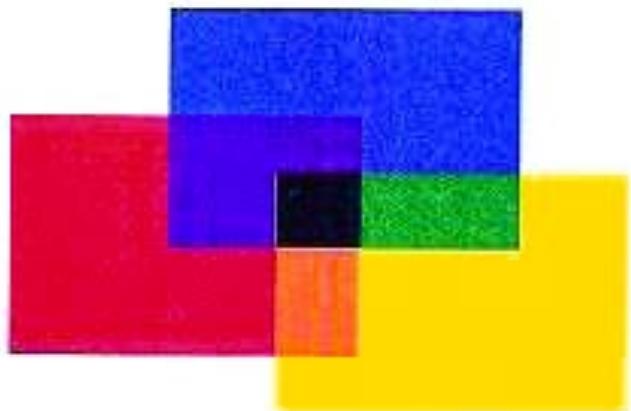
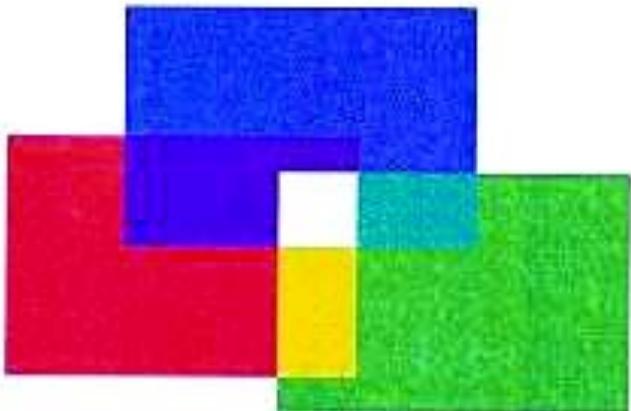
При дальнейшем увеличении освещенности глаз начинает различать цвет. Наименьшее значение освещенности на зрачке наблюдателя, соответствующее этому моменту, называют *цветовым порогом* ( $E = 1$  лк).

Оказывается, что цветовой порог для красного цвета совпадает со световым порогом, а для остальных цветов лежит выше светового порога. Это значит, что очень слабый зеленый или синий цвет наблюдатель не будет различать до наступления цветового порога.

Для красных лучей характерна большая проходимость в атмосфере. Красный цвет имеет значительное психологическое воздействие, поэтому он и выбран в качестве запрещающего.



. 12.



. 13.

Имеются приборы для проверки насыщенности цвета (колориметры).

Каждой длине волнам света соответствует разное значение светового порога: раньше других становятся заметными синие объекты, позже всех красные).

*Длина световой волны ( $\lambda$ ) определяет цвет*

$$\lambda = c / \nu \text{ (м),}$$

где  $c$  – скорость света  $3 \cdot 10^8$  (м/с);  $\nu$  – частота колебаний ( $\text{с}^{-1}$ ) = ( $\text{Гц}$ ).

Область видимой части спектра заключена в границах длин волн от 760 до 380 нм.

Опыт показывает, что для получения белого света достаточно смешать лучи всего двух определенных цветов, например, синий и желтый или оранжевый и голубой. Два цвета, образующие при смешивании белый цвет, называются *дополнительными*. Все другие цвета можно получить при смешивании цветных лучей по два, по три, по четыре и т.д. Опыты показали, что для получения всевозможных цветов достаточно смешать лучи только трех определенным образом выбранных цветов – синего, зеленого и красного (рис. 13, цветная вклейка).

Если попадает в глаз только один из перечисленных выше цветов, то он приводит в действие соответствующие оконечности.

Если же предмет в одинаковой степени отражает большую часть лучей всех цветов, входящих в состав белого цвета, то он кажется белым, если в одинаковой степени поглощает только часть лучей, то серым; если же поглощает почти все лучи – черным.

При прохождении всех лучей сквозь предмет без поглощения (например, через воду, воздух, стекло) он будет бесцветным.

Направим на красную бумагу и красное стекло пучок белого света. Бумага и стекло поглотят все лучи из состава упавшего на них света, за исключением красных. Но красная бумага отразит красные лучи, а красное стекло пропустит их. Поэтому бумага будет казаться красной в отраженном свете, а стекло будет красным на просвет.

Таким образом, окраска тел объясняется избирательным поглощением, т.е. свойством тел поглощать в неодинаковой степени лучи разных цветов.

## **4. Временные и усталостные зависимости свойств зрения**

Время, необходимое для возникновения зрительного ощущения, зависит от яркости объекта и длины волны и в среднем колеблется от 0,025 до 0,1 с.

При осмотре объектов его привлекающие внимание детали поочередно проецируются на центральную часть сетчатки глаза, обладающую максимальной разрешающей способностью.

Глазу свойственна инерция. Возникшее световое ощущение исчезает не сразу. Поэтому быстро движущаяся точка видна в виде светящейся линии. Критическая частота слияния зависит от амплитуды колебаний (контраста) и обычно не превышает 50 Гц.

Глаз в процессе наблюдения то относительно неподвижен, то резким движением поворачивается на угол 10...20°. В среднем происходит от 2 до 5-ти движений в секунду. При этом скорость луча зрения, скользящего по детали, достигает 300...400 мм/с. Трещины длиной 2...5 мм при такой скорости осмотра могут быть не обнаружены, так как продолжительность их осмотра мала (0,005...0,01 с.) и зрительное ощущение не успевает сформироваться. Эти ограничения должны учитываться при контроле деталей.

Непрерывное визуальное обследование становится нередко тяжелой нагрузкой для глаза, поэтому рано или поздно появляется усталость.

Следствием визуальной усталости является появление ошибок и пропусков в работе дефектоскописта. С медицинской точки зрения самыми частыми симптомами усталости являются покраснения глаз и головные боли.

Визуальная усталость растет по мере понижения освещения в рабочей зоне. Неправильное освещение с сильным всплеском яркости или густая затемненность усиливают усталость. Монотонность работы снижает внимание и качество работы оператора.

## **5. Адаптация глаза, его пороговая чувствительность, цветовая слепота**

*Адаптацией* называется способность глаза приспосабливаться к различным условиям освещенности. Различают световую (дневную) и темновую (сумеречную) адаптацию. Понижение чувстви-

тельности глаза при световом раздражении называется световой адаптацией.

При ярком освещении сужается зрачок от 8 до 2 мм и, следовательно, площадь зрачка уменьшается в 16 раз.

Повышение чувствительности глаза называется темновой адаптацией.

Величина абсолютного светового порога глаза очень мала и колеблется у разных людей от  $5 \cdot 10^{-19}$  до  $1 \cdot 10^{-17}$  Дж/с или в среднем соответствует освещенности на зрачке глаза порядка  $10^{-9}$  лк.

При различных освещенностях чувствительность сетчатки изменяется в 10000 раз. Процесс адаптации требует времени до 1 ч. При контроле необходимо создать нормальную освещенность в пределах от 50 до 250 лк.

Все цвета делят на хроматические и ахроматические.

Хроматические цвета воспринимаются и отличаются своей цветностью. Это качество носит название *цветового тона*. При средней яркости нормальный глаз человека способен различать в спектре приблизительно 150 цветовых тонов; кроме того, при сочетании красных и синих тонов образуется пурпурный цвет – их глаз различает около 30. Следовательно, он может воспринимать 180 цветовых тонов. Изменение цветности наиболее хорошо ощущается в следующих областях спектра: в зелено-голубом ( $\lambda \cong 495$  нм), оранжево-желтом ( $\lambda \cong 585$  нм) и оранжево-красном ( $\lambda \cong 640$  нм).

Известно, что цвета, даже одинаковые по цветовому тону, в зависимости от условий наблюдения могут казаться светлее или темнее. Это качество получило название *светлоты*. Опыт показывает, что для каждого хроматического цвета может быть подобран серый, который будет восприниматься одинаково светлым, иначе говоря, оба будут обладать одинаковой светлотой.

Цвет любого тела вызван избирательным поглощением и отражением; коэффициент отражения таких тел будет зависеть от  $\lambda$ . Поэтому для сравнения следует руководствоваться светлотой соответствующих серых тонов. Приблизительное представление о светлоте цветных поверхностей дает табл. 24, где приведены коэффициенты отражения равных по светлоте цветных поверхностей.

Таким образом, три качества цвета – цветовой тон, насыщенность и светлота – являются основными характеристиками, полностью и однозначно определяющими цвет. Ахроматические цвета отличаются лишь по светлоте.

**Таблица 24. Коэффициенты отражения цветных поверхностей**

Цвет поверхности	Коэффициент отражения
Черный	0,04
Темно-синий	0,10
Темно-красный	0,10
Темно-серый	0,15
Зеленый	0,16
Оранжево-красный	0,23
Голубой	0,45
Желтый	0,55
Белый	0,70...0,90

Цветовой тон спектрального монохроматического цвета однозначно определяется длиной волны, но она характеризует его только с качественной стороны. Интенсивность монохроматического цвета определяется количеством энергии, переносимой данным световым потоком. Нормальный глаз человека неодинаково чувствителен к лучам с различной  $\lambda$  (наибольшая чувствительность лежит в области желто-зеленых лучей около  $\lambda \approx 555$  нм). Чувствительность уменьшается при продвижении к красному и фиолетовому цветам спектра.

На рис. 14,*a* показана кривая относительной яркости (светлоты) лучей спектра одинаковой интенсивности, она носит название *кривой видности*. Эта кривая показывает, что при одинаковой интенсивности монохроматические цвета обладают различной светлотой. Следовательно, светлота таких цветов зависит как от интенсивности излучения, так и от видности. Вместе с тем интенсивность цвета определяется с одной стороны насыщенностью, а с другой – светлотой. Поэтому при равной насыщенности цветов более интенсивными будут светлые цвета, а при равной светлоте – более насыщенные.

Два световых потока с одинаковым распределением энергии физически совершенно одинаковы; визуально они будут также тождественны по цвету. Однако, если два потока дают одинаковое цветовое ощущение, то обратное заключение оказывается, как правило, несправедливым, а именно: опыт показывает, что излучения, воспринимаемые как одинаковые по цвету, могут обладать совершенно разным спектральным составом, а цветовые ощущения определяются тремя переменными – цветовым тоном, насыщенностью и светлотой.

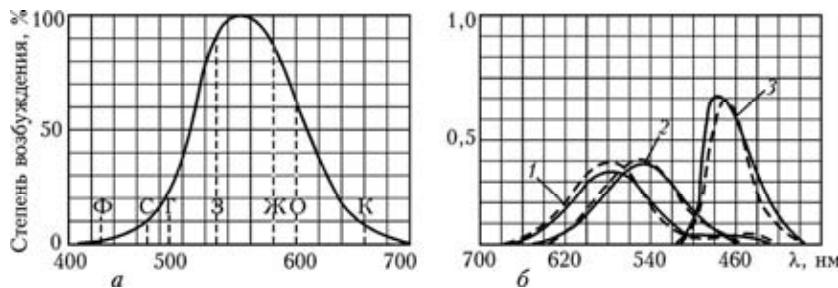


Рис. 14. Кривая изменения относительной яркости лучей спектра одинаковой интенсивности (кривая видности) (а) и кривые основных возбуждений глаза (б):

1 – красноощущающий; 2 – зеленоощущающий; 3 – синеощущающий элементы; сплошная кривая – дневное зрение; штриховая кривая – ночные зрение

Если в качестве основных принять два крайних цвета спектра – красный и фиолетовый – и один в средней области – зеленый ( $\lambda = 540$  нм), то при смешении этих основных цветов в надлежащих пропорциях могут быть получены цвета всех тонов.

Возможность получения всех цветов из трех основных убеждает в том, что и в глазу человека цветовое ощущение создается в результате суммирования трех лучей: красного, зеленого и синефиолетового. Иными словами, при ощущении любого цвета происходит возбуждение трех соответствующих приемников, только в разной степени. В связи с этим возникла трехкомпонентная (трехцветная) теория цветового зрения.

Трехцветная теория, естественно, выдвинула задачу о выявлении распределения по длинам волн возбуждений в глазу человека. Были построены кривые основных возбуждений (рис. 14, б). Из этих данных следует, что максимум спектральной чувствительности глаза в коротковолновой области падает при  $\lambda \sim 480$  нм, в средней части –  $\lambda \sim 550$  нм и в длинноволновой части –  $\lambda \sim 580$  нм.

Цветовой слепотой или цветовой недостаточностью отличаются люди, не способные различать три основных цвета. Отклонение цветового зрения от нормы может быть несколько незначительным, что лишь очень тонкие испытания способны его обнаружить. Наибольшая часть людей страдает именно этим видом отклонения от нормы, который называется «аномальным трихроматизмом». Сла-

бое цветовое зрение почти всегда явление наследственное. Оно присуще в какой-то степени приблизительно 8 % мужчин. У женщин слабое цветовое зрение встречается очень редко.

Монохроматическое зрение – явление исключительно редкое. Люди с этим недостатком видят только оттенки серого. Монохроматы обладают слабой остротой зрения, их зрительные образы напоминают черно-белые фотографии при плохой фокусировке.

## 6. Реальный образ и иллюзии при зрительном восприятии объекта

Чтобы действительно видеть при визуальном контроле ответственной продукции надо понимать, что видишь. Часто человек не успевает правильно оценить то, что находится в поле зрения глаз, он или не воспринимает изображение, или обманывает себя относительно того, что рассматривает. Исследования процессов распознавания образов показали, что зрительная система (глаз–мозг) при опознании работает удачно только тогда, когда он тренировался в поиске и расшифровке интересующих его изображений [1].

Если сумма предварительных знаний об опознаваемых объектах мала, отношение правильных ответов к неверным равно 2 : 9, тогда как при хорошем знании сфотографированных объектов это отношение изменяется на 11 : 1.

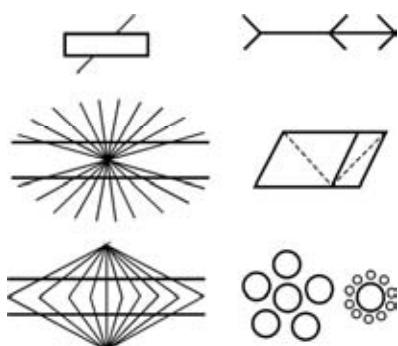


Рис. 15. Геометрические иллюзии искажения форм и размеров

На рис. 15 представлен ряд известных оптических искажений, неадекватных представлений об объекте: ошибки в оценке и сравнении между собой длин отрезков, величин углов, расстояний между элементами изображения, в восприятии формы их элементов и т.п. Ошибки эти весьма многочисленны и разнообразны.

На рис. 15 показан пример – иллюзия неравенства длин отрезков, иллюзия непараллельности прямых, иллюзия неравенства диаметров окружностей (круг, который окружен большими кру-

тами, кажется меньше круга, окруженными малыми). Этот и другие примеры показывают, что определенные элементы изображения или их части воспринимаются не отдельно, изолированно, а в связи с окружающими их элементами или их частями..

Величина иррадиаций К оптическим иллюзиям относятся также обманы зрения, вызванные явлением иррадиации. На рис. 16 показано явление кажущегося увеличения размеров светлых элементов изображения на темном фоне или кажущееся уменьшение размеров черных объектов на белом фоне — нерастет при увеличении яркости светлого фона или светлого элемента. Иррадиация обусловлена оптическими недостатками глаза (аберрацией — сферической и хроматической), дифракционными явлениями глаза, а также несовершенной установкой глаза на рассматриваемые элементы изображения.

Часто у операторов визуального контроля возникают споры, когда они своим воображением по разному дополняют изображение деталями, отсутствующими в рассматриваемом образе. Так, на рис. 17, а виден лоб, нос и подбородок, хотя они полностью и не изображены; на рис. 17, б видна несуществующая окружность, а на рис. 17, в видна буква А, очерченная параллельными тонкими линиями, часть из кото-



Рис. 16. Искажения, вызванные иррадиацией

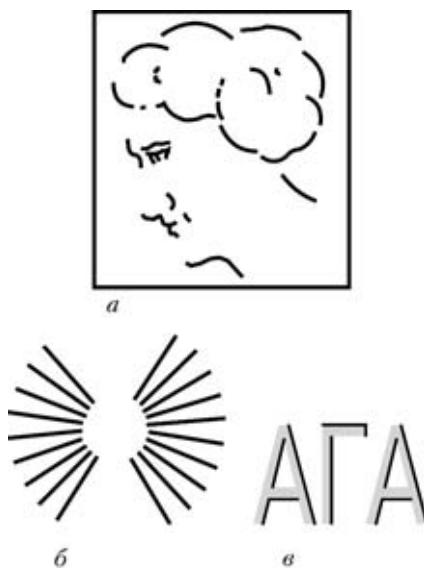


Рис. 17. Достраивание образа

рых не представлена на этом рисунке; на рис. 17,2 легко прочитать **ПЕРВЫЙ ШАГ**, хотя каждая буква изображена неполностью.

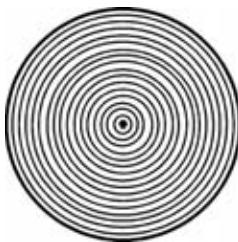


Рис. 18. Эффект последействия

При анализе таких фигур иногда происходит перестройка в формировании зрительных образов: восприятие может меняться как произвольно, в результате некоторого усилия воображения, так и непроизвольно и даже вопреки желанию.

Известен также феномен последействия зрительного образа. Так, если достаточно пристально смотреть на рис. 18, затем быстро взглянуть на черную точку справа, то будет возникать белый круг у этой точки с большим числом движущихся линий.

С рассмотренными эффектами достаточно близко связан феномен гистерезиса зрительного образа: если последовательно рассматривать картинки (рис. 19), например, слева направо и сверху вниз, то переход от зрительного образа мужского лица к женской фигуре обычно произойдет после пятого шага (на шестой картинке).



Рис. 19. Гистерезис при распознавании образов

При анализе картинок по цепочке в обратном направлении зрительный образ мужского лица в среднем формируется на пятом шаге (третья картинка).

## **Х. ИСТОЧНИКИ СВЕТА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

### **1. Технические и субъективные причины, снижающие качество визуального контроля**

При любом излучателе *прямое освещение* – самое неблагоприятное для глаз, так как при нем рабочее место освещается неравномерно и создаются резкие тени, а источник часто слепит дефектоскописта.

Отраженное освещение для глаз более благоприятно, однако при нем происходит значительная потеря света вследствие его поглощения отражающими поверхностями. Поэтому наиболее целесообразно применять полуотраженное освещение.

В качестве источников света более совершенными являются люминесцентные лампы, спектральный состав которых ближе к естественному, чем у ламп накаливания. Однако у них есть существенный недостаток – колебание светового потока (стробоскопический эффект), который устраняется установлением на рабочем месте трех ламп, подключенных к разным фазам электрической цепи, или использованием дросселей. Рабочие места для осмотра деталей целесообразно освещать ртутными люминесцентными лампами типа ЛД (ГОСТ 6825-73) – лампами дневного света.

Лампы накаливания должны быть в молочной – матированной колбе. Во внецеховых условиях используют переносные сетевые светильники РПО-220, РВО-220, ОП-6-3-220 и др. (ГОСТ 7110-75), а также источники света низкого напряжения ПЛ-36-10, ПЛ-64, ПВО-36, РВО-36 с подобными излучателями.

Контроль деталей во взрывоопасных помещениях проводят с применением ручных светильников СПВ-9 (ГОСТ 5.884-71) с напряжением питания 12 В. При этом сила света не должна быть меньшей, чем от промышленных электрических сетей.

Материал и цвет покрытия рабочей поверхности столов выбирают так, чтобы уменьшить яркостные контрасты в поле зрения

дефектоскописта, а также не допустить слепящего действия света, отраженного от покрытия.

Желательно покрывать столы *светло-зеленым или светло-голубым неблестящим пластиком. Поверхность стола не должна быть белой, ее нельзя покрывать стеклом, глянцевыми материалами.*

Для оценки достаточности освещения используют люксметры, например, мод. Ю-116, который состоит из фотоэлемента, снабженного корректирующими фильтрами. Шкалы люксметра неравномерные, градуировка их в люксах. Для этих же целей используются спектрорадиометры (СРП-86), болометры, фотометры и др.

Схема освещения зависит от размера и формы объекта и выбирается с учетом оптимальных условий выявляемости дефектов. Параметры источника света (интенсивность, спектр, поляризация, пространственно-временное распределение интенсивности, степень когерентности) следует выбирать так, чтобы обеспечить максимальный контраст изображения и комфортные условия для работы каждого оператора.

Для визуального контроля самыми значимыми являются специфические физические способности, опыт и зрительные способности дефектоскописта, которые сугубо индивидуальны, что часто является причиной противоречий в оценке результатов визуального контроля.

Совершенного зрения не бывает. Это значит, что необходимо учитывать индивидуальные несовершенства зрения, которые, разумеется, должны быть известны и корректироваться.

Перечислим некоторые дефекты зрения, которые должны быть учтены и скорректированы.

Наиболее часты *дальнозоркость и зрительная усталость*. Дальнозоркость корректируется двояковыпуклыми линзами. Распространена *близорукость*. Корректируется она двояковогнутыми линзами.

*Астигматизм* – это изменение кривизны хрусталика относительно меридианов, корректируется поворотом осей цилиндрических линз.

*Альбинизм* – отсутствие темных пигментов в глазном яблоке, затрудняющее адаптацию к свету.

*Ахроматопсия* – абсолютная слепота к цветовой гамме.

*Дальтонизм* – встречается у 1 % женщин и 6,6 % мужчин; имеет следующие вариации:

- *дефтеранопы* – не различают оттенков, но воспринимают яркость, не отличают красный от зеленого;

- *протонопы* – не воспринимают красный цвет;

- *тритантопы* – не воспринимают синий цвет.

*Катаракты* – помутнение хрусталика, чаще возрастное явление.

Острота зрения проверяется с 6 метров по таблице с буквами Снеллена или кольцами Ландиота.

Хроматические дефекты выявляются по тестам Ищихары – опознавание цифр, образуемых цветными точками на фоне точек нейтральных цветов.

Важный процесс – идентификация обследуемого объекта, – другими словами, что мы пытаемся обследовать и что пытаемся найти при сравнении с образцами. В таких случаях принято начинать смотреть «вдруг что-то увидишь». Сравнение идет с реальными образцами или хорошего качества фотографиями, которые необходимо изучить перед началом контроля и занести результаты в отчетную анкету после проведения контроля.

*Уровень и характер освещенности* устанавливается в соответствии с особенностями разыскиваемых отклонений от нормы:

- размер ожидаемых дефектов;

- их визуальный контраст.

Комплексный коэффициент отражения зависит от свойств материала поверхности, %: чистая сталь – 55...60; чистый алюминий – 65...75 %; гладкая бронза – 15...20; серебро блестящее – 85...92 и т.д.

Блеск материалов с высокой отражаемостью вызывает ослепление и зрительную усталость. Блеск уменьшают применением полированных стекол. Цилиндрические выпуклые части детали дают большое отражение (блеск), поэтому в этих случаях необходимо использовать рассеянное освещение.

Ровные или вогнутые части дают отблеск, который устраняется правильным расположением источника света и позиции глаз оператора.

Качество освещения можно поднять тем, что блестящие поверхности освещаются лампами с большими поверхностями рассеянного света.

Прямой визуальный контроль проводится только при дальнозорком зрении, когда глаза наблюдателя находятся на расстоянии не более 600 мм от обследуемого объекта и всегда под углом не более 30<sup>0</sup>.

## **2. Массовые источники теплового и люминесцентного излучения**

*Тепловым* называют оптическое излучение, возникающее при нагревании тел. У твердых тел оно имеет непрерывный спектр, зависящий от температуры тела и его излучающих свойств. Тепловыми излучателями являются все источники, свечение которых обусловлено нагреванием, например, электрические лампы накаливания.

Основные законы теплового излучения установлены для идеализированного, так называемого черного тела. В качестве него принято тело, которое поглощает все падающие на него излучения (коэффициент поглощения  $\alpha = 1$ ) независимо от длины волны, направления падения и состояния поляризации.

Все реальные тела являются либо серыми (спектральный коэффициент излучения у них меньше 1 и не зависит от длины волны), либо селективными (избирательными), у которых спектральный коэффициент теплового излучения зависит от длины волны. Тепловое излучение реальных тел описывается законами излучения черного тела с внесением в них экспериментально установленных коэффициентов. Так, для оценки интегрального значения тепловой энергетической светимости металла  $M_e(T)$  применяется выражение [1]:

$$M_e(T) = \varepsilon(T) M_{ex}(T) = \varepsilon(T) \sigma T^4,$$

где  $\varepsilon(T)$  – интегральный коэффициент теплового излучения металла;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>;  $T^4$  – постоянная Стефана–Больцмана.

*Люминесценцией* называют спонтанное излучение, избыточное над тепловым излучением, если его длительность значительно превышает период колебаний электромагнитной волны соответствующего излучения. Люминесценция наблюдается в газообразных, жидких и твердых телах.

В источниках света используются следующие виды люминесценции: *электролюминесценция* (оптическое излучение атомов, ионов, молекул, жидких и твердых тел под действием ударов электронов (ионов), движущихся со скоростями, достаточными для их возбуждения); *фотолюминесценция* (оптическое излучение, возникающее в результате поглощения телами оптического излучения).

Излучение характеризуется потоком (световым)  $\Phi_e$  ( $\Phi_v$ ), силой излучения  $I_e$  (силой света  $I_v$ ), энергетической (световой) яркостью  $L_e$

$(L_v)$ , ее распределением по поверхности светящегося тела и направлением, спектральной плотностью перечисленных выше величин (спектром излучения). Цвет излучения ламп дополнительно характеризуется цветовыми параметрами.

Электрический режим характеризуется: мощностью лампы  $P_{\text{л}}$ , рабочим напряжением  $U_{\text{л}}$ , величиной электрического тока  $I$  и родом тока.

Основными показателями долговечности являются полный и полезный срок службы.

Под *полным сроком службы* понимают продолжительность горения ламп от начала эксплуатации или испытания до момента полной утраты ими работоспособности.

*Полезным сроком службы* называют продолжительность горения ламп от начала эксплуатации до момента ослабления одного из параметров, определяющих целесообразность использования ламп данного типа.

Подавляющее большинство современных источников света относятся к категории электрических. По принципу действия их можно разделить на две большие группы. Это лампы накаливания и газоразрядные лампы.

*Главным недостатком осветительных ламп накаливания является низкая световая отдача, составляющая 10...20 лм/Вт при сроке службы 1000 ч; световая отдача галогенных ламп накаливания несколько выше – 26 лм/Вт при сроке службы 2000 ч.*

Газоразрядной лампой называют лампу, в которой оптическое излучение возникает в результате электрического разряда в газах, парах или их смесях.

У газоразрядных ламп световая отдача в 5...20, а срок службы в 10...20 раз превышает световую отдачу и срок службы ламп накаливания. Наиболее массовыми из газоразрядных ламп являются люминесцентные лампы. Люминесцентные лампы представляют собой разрядные источники света низкого давления, в которых ультрафиолетовое излучение ртутного разряда преобразуется люминофором в более длинноволновое излучение.

### 3. Светоизлучающие диоды

Светоизлучающие диоды представляют собой миниатюрные полупроводниковые источники света, в которых излучение возни-

кает на полупроводниковом переходе в результате рекомбинации электронов и «дырок». В светоизлучающих диодах используются полупроводниковые материалы высокой чистоты, легированные малыми количествами примесей, создающих либо избыток электронов (материал *n*-типа), либо их недостаток, т.е. избыток «дырок», которые ведут себя подобно положительным зарядам (материал *p*-типа).

В месте контакта материалов *p*- и *n*-типов образуется полупроводниковый *p-n* переход. Если к *p-n* переходу приложить постоянное напряжение в несколько вольт прямой полярности (т.е. к *n*-материалу минус, а к *p*-материалу плюс), то приложенное поле будет заставлять перемещаться электроны и «дырки» навстречу друг другу и они будут рекомбинировать в зоне контакта, частично испуская при этом фотоны. Размеры контакта с *p-n* переходом очень малы, обычно порядка  $10^{-3}\dots10^{-4}$  см<sup>2</sup>, столь же мала и область свечения. Это позволяет делать светоизлучающие диоды очень малых размеров. Свечение возникает на границе полупроводников и выходит наружу сквозь один из полупроводниковых материалов и через зазор между двумя материалами.

Светоизлучающие диоды работают от источника постоянного напряжения 1…3 В при токах от 10 до 100 мА. Сила света порядка 0,01…0,02 кд. Световая отдача желто-зеленого светоизлучающего диода из фосфида галлия достигает нескольких сот люмен на ватт, но поток излучения очень невелик. Мощность инфракрасного излучения составляет 5…7 мВт на 100 мА. Светодиодные излучатели, состоящие из 30…50 диодов, располагаемые под одним рефлектором при равном локальном освещении потребляют в 50…100 раз меньше электроэнергии, чем лампы накаливания.

## 4. Лазеры

Лазеры представляют собой генераторы оптического излучения, обладающего совершенно уникальными свойствами:

- высокой когерентностью в пространстве и во времени;
- исключительно узкой направленностью (расходимость до 0,4');
- огромной концентрацией мощности (до  $10^{11}$  Вт/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме и до  $10^{18}$  Вт/см<sup>2</sup> в импульсе);
- высокой степенью монохроматичности ( $\Delta\lambda = 10^{-9}$  нм при  $\lambda = 500$  нм);

- способностью фокусироваться в исключительно малые объемы порядка  $\lambda^3$ .

Принцип действия лазеров основан на использовании испускания фотона возбужденным атомом или молекулой под воздействием излучения, имеющего ту же частоту. Самое важное в этом процессе, что фотон, возникший при вынужденном испускании, совершенно тождественен с вызвавшим его внешним фотоном по направлению, частоте, фазе и поляризации. Этот принцип справедлив для всего спектра электромагнитного излучения.

Удалось создать такие искусственные условия, при которых концентрация возбужденных атомов или молекул на верхних энергетических уровнях была бы больше, чем их концентрация на нижних, соответствующих оптическим переходам между ними. Такая необычная «заселенность» энергетических уровней называется *инверсной*, так как в обычных условиях концентрации возбужденных атомов или молекул резко убывают с ростом энергии возбужденного уровня. Среда с инверсной заселенностью называется *активной*. Излучение с частотой, соответствующей инверсному переходу, проходя через активную среду, вызывает лавину вынужденных фотонов, «летящих» строго в одном направлении, и вместо обычного ослабления получается усиление излучения в направлении падающего луча.

Активная среда может создаваться только за счет подвода энергии извне. Процесс перевода лазерного вещества в активное состояние называется *накачкой*. Лазер состоит из трех основных узлов: излучателя, системы накачки и источника питания, а также вспомогательных устройств, обеспечивающих его нормальную работу и управление лазерным излучением.

Излучатель предназначен для преобразования энергии накачки в лазерное излучение. Он содержит один или несколько лазерных элементов, помещенных в оптический резонатор. Активный элемент является основной функциональной частью излучателя, содержащей лазерное вещество, в котором в процессе накачки может быть создана активная среда. Лазерное вещество может находиться в газообразном, жидком и твердом состояниях. Соответственно различают: газовые, жидкостные, твердотельные и полупроводниковые лазеры.

Оптический резонатор в общем случае представляет собой систему отражающих, преломляющих, фокусирующих и других оптических элементов, в пространстве между которыми могут возбуж-

даться определенные типы колебаний электромагнитного поля оптического излучения. Он должен иметь минимальные потери на поглощение в рабочей части спектра (коэффициент отражения одной из поверхностей часто больше 0,99) и высокую оптическую точность узлов и их установки относительно друг друга.

Системы накачки представляют собой совокупность элементов, предназначенных для преобразования энергии и передачи ее от внешнего источника к лазерному элементу. Накачка осуществляется в основном тремя способами:

- электрическим разрядом (газовые лазеры);
- оптическим излучением (твердотельные и жидкостные);
- инжекцией – «впрыскиванием» электронов в *p-n* переход (полупроводниковые).

Помимо этого существуют также газодинамические, химические и другие способы накачки.

Основные технические параметры наиболее распространенных лазеров даны в табл. 19.

**Таблица 19. Некоторые параметры лазеров**

Тип лазеров	Длина волны, мкм	Режим работы	Мощность лазерного излучения, Вт	Частота импульсов, Гц	КПД, %
1	2	3	4	5	6
<b>Газовые атомные гелий-неоновые</b>	0,63	Н	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	–	0,05
<b>Ионно-argonовые</b>	0,488; 0,515	Н	$0,1 \dots 10^2$	–	0,01
<b>Молекулярные на CO<sub>2</sub></b> отпаянные продольно-прокачные	10,6	Н Н И	$10 \dots 10^2$ $10^2 \dots 10^4$ $10^6 \dots 10^{9*}$	– – 25...100	5...10 5...6 15...20
<b>Твердотельные</b> на рубине На неодимовом стекле	0,693 1,058	ИСГ ИСГ	$10^2 \dots 10^6$ $10^4 \dots 10^{6*}$	0,01...10 0,01...0,003	1 5...6
На ИАГ Nd <sup>3+</sup>	1,06 1,06	Н ИСГ	$10 \dots 10^3$ $10^5 \dots 10^{7*}$	10...10 <sup>2</sup>	2...3 1,5...2

Продолжение табл. 19

1	2	3	4	5	6
<b>Полупроводнико-вые</b> на арсениде галлия	0,84	И	2...70*	$(0,5...5)10^3$	До 50
<b>Жидкостные на красителях</b>	0,34...0,89	И	—	0,03...25	До 50

Здесь: Н – непрерывный режим; И – импульсный; ИСГ – импульсный режим свободной генерации (\* – импульсная мощность).

## 5. Нормирование отдельных типов освещения

Освещение нормируется СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» на следующие категории.

1. Боковое естественное освещение.
2. Верхнее естественное освещение.
3. Естественное освещение – освещение помещений дневным светом (прямым или отраженным), проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях.
4. Комбинированное освещение – освещение, при котором к общему освещению добавляется местное.
5. Комбинированное естественное освещение – сочетание верхнего и бокового естественного освещения.

Контраст объекта различия с фоном  $K$  определяется отношением абсолютной величины разности между яркостью объекта и фона к яркости фона [12].

Контраст объекта различия с фоном считается:

- большим – при  $K$  более 0,5 (объект и фон резко отличаются по яркости);
- средним – при  $K$  от 0,2 до 0,5 (объект и фон заметно отличаются по яркости);
- малым – при  $K$  менее 0,2 (объект и фон мало отличаются по яркости).

Часто используется коэффициент естественной освещенности (КЕО) – отношение естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке светом неба к одновременному значению наружной освещенности, создаваемой светом полностью открытого небосвода; выражается в процентах.

Употребляется понятие коэффициент запаса  $K_3$  – расчетный коэффициент, учитывающий снижение КЕО и освещенности в процессе эксплуатации вследствие загрязнения и старения источников света, а также снижение отражающих свойств поверхностей.

Коэффициент пульсации освещенности  $K_n$ , % – критерий оценки относительной глубины колебания освещенности в результате изменения во времени светового потока газоразрядных ламп при питании их переменным током, выраженный формулой

$$K_n = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{cp}} \cdot 100,$$

где  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  – соответственно максимальное и минимальное значения освещенности за период ее колебания, лк;  $E_{cp}$  – среднее значение освещенности за этот же период.

Используется показатель дискомфорта  $M$  – критерий оценки неравномерности распределения яркости в поле зрения, выраженный формулой

$$M = \frac{L\omega^{0,5}}{\varphi_0 L_{ad}^{0,5}},$$

где  $L$  – яркость источника, кд/м<sup>2</sup>;  $\omega$  – угловой размер источника, стер;  $\varphi_0$  – индекс позиции блестящей поверхности относительно линии зрения;  $L_{ad}$  – яркость адаптации, кд/м<sup>2</sup>.

Критерий  $P$  оценки слепящего действия осветительной установки определяется выражением:

$$P = (S - 1)1000,$$

где  $S$  – коэффициент ослепленности, равный отношению пороговых разностей яркостей при наличии и отсутствии слепящих источников в поле зрения.

Принято считать, что условная рабочая поверхность – это горизонтальная поверхность, расположенная на высоте 0,8 м от пола. Это зона комфорта изучения поверхности.

Фон считается:

- светлым – при коэффициенте отражения поверхности более 0,4;
- средним – тот же, от 0,2 до 0,4;
- темным – тот же, менее 0,2.

Существует определение *эквивалентный размер объекта различия* – это размер равнояркого круга на равноярком фоне, имеющем такой же контраст, что и объект различия при данной яркости фона.

Общие требования предприятий к освещенности в зависимости от характера зрительской работы изложены в табл. 20.

**Таблица 20. Требования к освещению рабочих мест на промышленных предприятиях**

Характеристика зрительной работы	Эквивалентный размер объекта различия, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Освещенность, лк		
						комбинированная		общая
						всего	в т.ч. от общего	
Наивысшей точности	менее 0,15	I	a	Малый	Темный	5000 4500	500 500	- -
			б	Малый Средний	Средний Темный	4000 3500	400 400	1250 1000
			в	Малый Большой	Светлый Темный	2500 2000	300 200	750 600
			г	Средний Большой	Светлый Средний	1500 1250	200 200	400 300
Очень высокой точности	от 0,15 до 0,30	II	а	Малый	Темный	4000	400	-
			б	Малый Средний	Средний Темный	3000 2500	300 300	750 600
			в	Малый Большой	Светлый Темный	2000 1500	200 200	500 400
			г	Средний Большой	Светлый Средний	1000 750	200 200	300 200
Высокой точности	от 0,30 до 0,50	III	а	Малый	Темный	2000	200	500
			б	Малый Средний	Средний Темный	1000 750	200 200	300 300
			в	Малый Большой	Светлый Темный	750 600	200 200	300 200
			г	Средний	Светлый	400	200	200
Средней точности	от 0,5 до 1,0	IV	а	Малый	Темный	750	200	300
			б	Малый	Средний	500	200	200
			в	Средний	Средний	400	200	200

Здесь наименьшие размеры объекта различия и соответствующие им размеры зрительной работы установлены при расположении объекта различия на расстоянии не более 0,5 м от глаза

работающего. При увеличении этого расстояния разряд зрительной работы следует устанавливать в соответствии с табл. 21.

**Таблица 21. Зависимость разряда работ при расстоянии от объекта различения до глаз работающего более 0,5 м**

Разряд зрительной работы	Пределы отношения $d/l$
I	Менее $0,3 \cdot 10^{-3}$
II	От $0,3 \cdot 10^{-3}$ до $0,6 \cdot 10^{-3}$
III	Свыше $0,6 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-3}$
VI	$-'' - 1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$
V	$-'' - 2 \cdot 10^{-3}$ до $10 \cdot 10^{-3}$
VI и VII	$-'' - 10 \cdot 10^{-3}$

При расстоянии от объекта различения до глаз работающего более 0,5 м разряд работ (по табл. 21) следует устанавливать с учетом углового размера объекта различения, определяемого отношением минимального размера объекта различения  $d$  к расстоянию от этого объекта до глаз работающего  $l$  (табл. 21).

## **6. Освещение различных производственных помещений**

Нормы освещенности, приведенные в табл. 21, следует повышать на одну ступень шкалы освещенности в следующих случаях:

а) при работах I – IV разрядов, если зрительная работа выполняется более половины рабочего дня;

б) при работе или производственном обучении подростков, если освещенность от системы общего освещения 300 лк и менее;

в) при отсутствии в помещении естественного света и постоянном пребывании работающих, если освещенность от системы общего освещения 750 лк и менее;

г) при постоянном поиске объектов различия на поверхности размером  $0,1 \text{ м}^2$  и более;

д) в помещениях, где более половины работающих старше 40 лет.

Отношение максимальной освещенности [3] к минимальной не должно превышать: для работ I – III разрядов при люминесцентных лампах 1,3, при других источниках света – 1,5, для работ разрядов IV – VII – 1,5 и 2,0 соответственно.

Неравномерность освещенности допускается повышать до 3,0 в тех случаях, когда по условиям технологии светильники общего освещения могут устанавливаться только на площадках, колоннах или стенах помещения.

Яркость рабочей поверхности не должна превышать значений, указанных в табл. 22.

В отдельных отраслях промышленности требования к освещенности особые.

**Таблица 22. Требования к яркости рабочей поверхности в зависимости от ее площади**

Площадь рабочей поверхности, м <sup>2</sup>	Наибольшая допустимая яркость, кд/м <sup>2</sup>
Менее $1 \cdot 10^{-4}$	2000
От $1 \cdot 10^{-4}$ до $1 \cdot 10^{-3}$	1500
Свыше $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-2}$	1000
Свыше $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-1}$	750
Более $1 \cdot 10^{-1}$	500

На предприятиях *черной металлургии* проводятся работы, связанные с большим зрительным напряжением по браковке, сортировке, удалению дефектов, клеймению прокатных заготовок и готовой продукции. Эти отделения занимают значительные площади, достигающие нескольких тысяч квадратных метров при ширине зоны работы от 3 м до всей ширины пролета (36 м).

Наиболее напряженными операциями являются обнаружение трещин, зарезов и т.п., ширина которых может составлять 0,02 мм, и контроль за их удалением.

Работа по удалению дефектов относится к разряду IIб и требует при одном общем освещении обеспечивать освещенность 750 лк. Эту освещенность рекомендуется создавать на всей площади осветительными приборами с газоразрядными лампами высокого давления, установленными в верхней зоне цеха.

Для приведения уровня освещенности до требуемого разрядом Ia значения 4000 лк при комбинированном освещении люминесцентными лампами при работе контролеров пользуются ручными переносными осветительными приборами. В связи с трудностью устройства местного стационарного освещения и применения ручных переносных осветительных приборов рекомендуется устраивать общее освещение с освещенностью 1500 лк.

В цехах горячей прокатки листы лежат на стеллажах высотой 0,1...0,2 м и контролеры ходят по листам и отмечают мелом выявленные дефекты, которые удаляются переносными наждачными точилами. Поверхность листов темная, работа относится к разряду Ia.

В цехах холодного проката стопы листов подносятся краном к столам контролеров, поверхность листов светлая, работы относятся к

разряду Iб. Трудность устройства местного освещения и неудобство применения переносных осветительных приборов приводят к необходимости устройства общего освещения, выполняемого осветительными приборами, устанавливаемыми в верхней зоне цеха и создающими нормируемую освещенность по всему пролету 1500...2000 лк. Дополнительно устанавливаются осветительные приборы локализованного освещения. При расположении рабочих столов контролеров на удалении до 10 м от края пролета осветительные приборы локализованного освещения устанавливаются на стенах и колоннах.

Для контроля листов с большим зеркальным отражением эффективны системы освещения отраженным светом. Одним из возможных решений таких осветительных установок может быть вогнутая отражающая поверхность, расположенная на расстоянии 1,2...1,5 м над рабочим столом и освещаемая направленными на нее снизу осветительными приборами с люминесцентными лампами.

*В гальванических цехах*, в отделениях шлифовки и полировки визуальный контроль качества обработки покрытия осложняется наличием блестящих поверхностей. Здесь дефекты в покрытии имеют размер от 0,15 до 1 мм, их фотометрический контраст с фоном малый.

*В цехах окраски* оценивается качество лакокрасочных покрытий, нанесенных на поверхность изделий, по их внешнему виду. При покрытиях I класса допускаются только некоторые едва различимые дефекты, при покрытиях II – VI классов размеры дефектов допустимы в определенных пределах, при покрытии VII класса показатели внешнего вида покрытий не нормируются (табл. 23).

**Таблица 23. Рекомендуемое соотношение классов лакокрасочных покрытий и разрядов зрительной работы**

Класс покрытия	Размер допустимых включений на поверхности, мм	Характеристика зрительных работ	
		Точность	Наименьший размер объекта различия, мм
I	0,2	Очень высокая	0,15...0,3
II, III	0,2...0,5	Высокая	0,3...0,5
IV, V	0,5...1	Средняя	0,5...1
VI	1...0,5	Малая	1...5
VII	-	Очень малая	-

Специфика окрасочных работ обуславливает использование источников света, обеспечивающих различение цветов и оттенков. Наиболее эффективны для этой цели люминесцентные лампы.

## **XI. ИНСТРУМЕНТЫ ДЛЯ ОПТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **1. Требования к аппаратуре визуально-оптического контроля**

В ГОСТ 12997-76 сформулированы основные характеристики аппаратуры оптического контроля:

- диапазон контролируемых параметров;
- разрешающая способность;
- поле зрения;
- увеличение;
- основная и дополнительная погрешности.

Величины погрешности аппаратуры должны соответствовать специальному ГОСТ 8.009-72 [2].

Аппаратура оптического контроля должна обеспечивать качество изображения дефектов (яркость, цвет, контраст, размер, время анализа), необходимое для обеспечения оптимальных условий их наблюдения.

Для защиты от попадания в глаз дефектоскописта мешающих наблюдению световых лучей аппаратура должна иметь защитные устройства (диафрагмы, бленды и т.п.).

При выборе аппаратуры следует предпочтдать (при одинаковых характеристиках) приборы с экранным методом наблюдения, вызывающее меньшее зрительное утомление.

Для проверки аппаратуры непосредственно перед проведением контроля, а так же для контроля методом сравнения могут быть использованы образцы, специально изготовленные потребителем аппаратуры, с внесением определенного вида дефектов контролируемых поверхностей.

*Наименьший размер выявляемых дефектов должен не менее, чем в три раза превышать величину микронеровностей рельефа поверхности, ее шероховатости.*

Вспомогательные средства должны передавать изображение, сходное с получаемым простым глазом.

Приборы для визуально-оптического контроля по назначению разделяют на три группы:

1) средства увеличения мелких объектов, расположенных от глаза дефектоскописта в пределах наилучшего зрения 250 мм (лупы до 20 крат), микроскопы (до 100 крат);

2) средства приближения удаленных объектов, т.е. расположенных далее 250 мм (телескопические лупы, зрительные трубы, бинокли);

3) приборы для обследования недосягаемых точек внутренних поверхностей отверстий, полых деталей и конструкций, исследование объектов в зонах, опасных для человека. Это эндо- и бороскопы, перископические дефектоскопы, зеркала, цифровые телескопические и волоконно-оптические системы.

## 2. Зеркала, очковые линзы и очки

Одним из способов осмотра поверхностей, наклоненных менее  $30^0$  к зрительной оси глаза, является осмотр их с помощью зеркал.

Комбинация плоских зеркал может обеспечить также поворот изображения.

Все зеркальные поверхности должны быть совершенно плоскими, так как лишь при этом условии обеспечивается четкость изображения. В точных зеркалах зеркальное покрытие наносится на внешнюю плоскость. При таком изготовлении зеркала исключается влияние неточности изготовления второй плоской поверхности по отношению к первой и, что более важно, исключается появление паразитных изображений (двоений изображений). При наклонном положении зеркала с внутренним отражающим покрытием вносят также асимметрию в структуру пучка.

Для зеркальных покрытий, наносимых на стекло, используют в основном серебро, алюминий и хром.

Явление удвоения изображения в зеркалах с внутренним отражением часто исключают введением клиновидности в плоскопараллельную пластину.

Отражательная способность зеркала – около 95 % и может составить к концу срока службы около 70 %.

*Сферическим зеркалом* называют оптическую деталь, сферическая поверхность которой является отражательной. Точность изготовления поверхностей, необходимая для получения хороших изображений, доходит до 0,1 мкм.

Если отражающая поверхность обладает осью симметрии, то положение предмета и его изображения связаны с радиусом кривизны  $r$  у вершины  $O$  (рис.20) соотношением

$$\frac{l}{s} + \frac{l'}{s'} = \frac{2}{r},$$

где  $s$  – расстояние от вершины  $O$  зеркала до предмета  $A$ ,  $s'$  – расстояние до изображения  $A'$ .

Бесконечно малый отрезок длины  $l$ , перпендикулярный оси, изображается отрезком прямой  $l'$ , по аналогии  $l' = l(s'/s)$ . Если предмет находится в бесконечности, то  $s' = f' = r/2$ . Фокальная плоскость находится на расстоянии  $r/2$ .

*Линзой* называется оптическая деталь, ограниченная преломляющими поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью вращения. По оптическим свойствам линзы делят на две основные группы:

- положительные (собирательные);
- отрицательные (рассевающие).

Линзы отличаются расстоянием центров образующих их сферических поверхностей, радиусами и показателями преломления вещества, из которого они сделаны.

Величина оптической силы линзы определяется фокусным расстоянием. Фокусное расстояние зависит от кривизны преломляющих поверхностей, показателя преломления и толщины линзы. Двояковыпуклая линза с большой кривизной поверхности имеет меньшее фокусное расстояние и большую оптическую силу. Следовательно, оптическая сила линзы обратно пропорциональна заднему фокусному расстоянию

$$\Phi = 1/f',$$

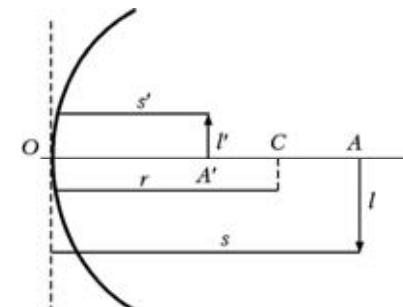


Рис. 20. Схема формирования изображения сферическим зеркалом

где  $\Phi$  – оптическая сила линзы;  $f'$  – заднее фокусное расстояние.

За единицу измерения оптической силы линзы принимается оптическая сила такой линзы, фокусное расстояние которой равно 1 м; такая единица называется диоптрией.

### Примеры.

У положительных линз с фокусным расстоянием  $f_1 = 0,2$  м и  $f_2 = 2$  м оптическая сила будет соответственно:

$$\Phi_1 = \frac{1}{0,2} = +5 \text{ (дптр);}$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{2} = +0,5 \text{ (дптр).}$$

Отрицательная линза с фокусным расстоянием  $f' = -0,2$  дптр имеет оптическую силу

$$\Phi = -\frac{1}{0,2} = -5 \text{ (дптр).}$$

Вследствие большого разнообразия расстройств зрительного аппарата человека разработано значительное количество оптических средств коррекции зрения. Они классифицируются по следующим характеристикам:

- по оптическим данным;
- характеру действия в системе, состоящей из корrigирующих линз и оптического аппарата глаза;
- конструктивным особенностям.

Все средства коррекции зрения могут быть разделены на две группы: одноэлементные и многоэлементные. К одноэлементным относятся очковые и контактные линзы, однолинзовье лупы, диафрагмы различных видов; к многоэлементным – телескопические системы, многолинзовье лупы, проекционные системы, катоптрические системы. Последние изменяют направление хода лучей. Они состоят из призмы и системы зеркал. Очковые линзы, являющиеся самыми массовыми средствами коррекции зрения, имеют большую разновидность и выпускаются в широком диапазоне рефракций и комбинаций.

Одним из условий высокой остроты зрения и хорошей контрастной чувствительности глаза является наличие на сетчатке резких изображений внешних объектов. Задача конструирования очковой линзы, удовлетворяющей этим требованиям, затруднена тем, что она, помещенная в очковую оправу, неподвижна; глаз же находится в постоянном движении. Чтобы обеспечить глазу возможность различать предметы отчетливо в любом направлении и полностью использовать при зрительной работе природное движение глазного яблока, необходимо по возможности устранить в очковой линзе астигматизм косых пучков лучей. Применение неастигматических очковых линз увеличивает угловой размер поля зрения более чем в три раза при сохранении четкого изображения на сетчатке.

Просветленные очковые линзы отличаются от обычных очковых линз увеличением светопропускания на несколько процентов. Эти линзы почти не дают мешающих рефлексов и двойного изображения. Просветление проводится нанесением просветляющих пленок вакуумным способом.

### **3. Свойства линз, устройство луп, использование их в промышленности**

*Лупой* называется оптическая система, состоящая из линзы или системы из нескольких линз, предназначенная для наблюдения предметов, расположенных на конечном расстоянии. К основным характеристикам лупы относят видимое увеличение  $\Gamma$ , линейное поле  $2y$  в пространстве предметов и свободный световой диаметр (диаметр выходного зрачка)  $D$ .

Видимым увеличением лупы называется отношение тангенса угла, под которым виден предмет через лупу, к тангенсу угла, под которым наблюдается предмет невооруженным глазом (рис. 21), т.е. увеличение

$$\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \omega'}{\operatorname{tg} \omega},$$

где

$$\operatorname{tg} \omega' = y / f';$$

$$\operatorname{tg} \omega = y / 250.$$

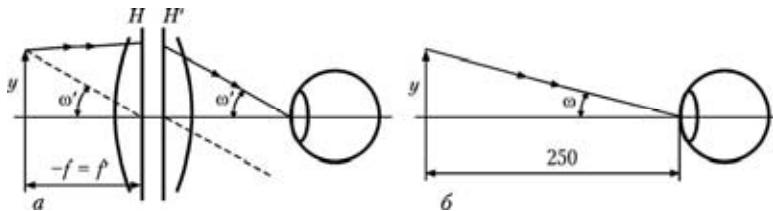


Рис. 21. Схема определения видимого увеличения лупы

Таким образом, увеличение  $\Gamma$  лупы при отсутствии аккомодации глаза определяется отношением:

$$\Gamma = \frac{250}{f'},$$

где  $f'$  – заднее фокусное расстояние, цифра 250 представляет собой среднее минимальное расстояние в мм от объекта до «нормального» невооруженного глаза.

Лупы и портативные микроскопы, устанавливаемые на поверхности изделия, позволяют обнаруживать трещины различного происхождения, поверхностные коррозионные и эрозионные повреждения, забоины, открытые раковины, язвы, поры, выкрашивание материала деталей, риски, задиры и другие поверхностные дефекты.

Лупы – наиболее распространенные оптические инструменты, дающие степень увеличения обычно до 20 крат. Лупы, дающие увеличение свыше 20 крат, принято называть простыми микроскопами, так как они могут включать и составные линзы. Их параметрами являются:

- увеличение лупы (мощность);
- фокусное расстояние;
- линейное поле зрения (широта и степень плоскости);
- коррекция хроматической aberrации;
- вид зрения: монокулярное или бинокулярное.

Эти параметры взаимно связаны – улучшение одних неизбежно ведет к ухудшению других таких же важных. Например, невозможно воспользоваться бинокулярной системой при малом фокусном расстоянии; нельзя поднять увеличение, не сокращая поле зрения и усиливая хроматическую aberrацию.

Простая лупа состоит из собирающей, обычно двояковыпуклой линзы с малым фокусным расстоянием (рис. 22).

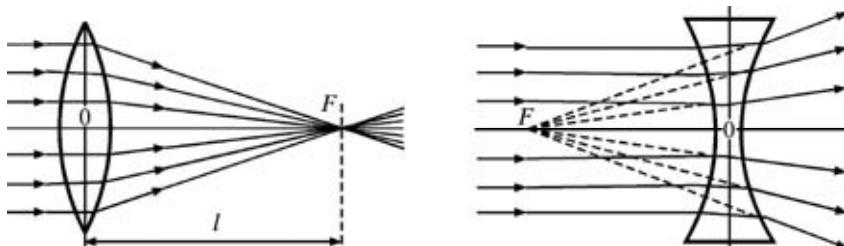


Рис. 22. Прохождение лучей света в двояковыпуклой и двояковогнутой линзах

Прямая, проходящая через центры  $C_1$  и  $C_2$  сферических поверхностей, ограничивающих линзу, называется *оптической осью линзы* (рис. 23). Точку  $O$ , лежащую на оптической оси в центре линзы, называют *оптическим центром линзы*.

Если направить на линзу поток лучей, параллельных ее оптической оси, то лучи дважды преломляются при переходе из воздуха в линзу и при выходе из нее в воздух. В результате этого они изменяют свое направление и пересекутся в одной точке, лежащей на оптической оси линзы. Эту точку называют *фокусом линзы* ( $F$ ) (рис. 22).

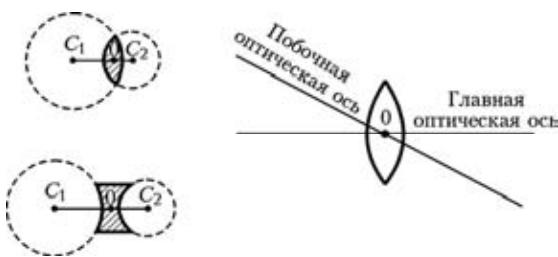


Рис. 23. Оптическая  $C_1C_2$ , побочная и главная оптические оси линзы

Расстояние от оптического центра линзы до этой точки называется *фокусным расстоянием линзы*. У каждой линзы два фокуса по одному с каждой стороны.

В зависимости от того, на каком расстоянии от линзы находится предмет, зависит его изображение. Рассмотрим подробные условия, при которых возникает то или иное изображение, и свойства каждого из них.

1. Предмет находится между линзой и ее фокусом (рис. 24).

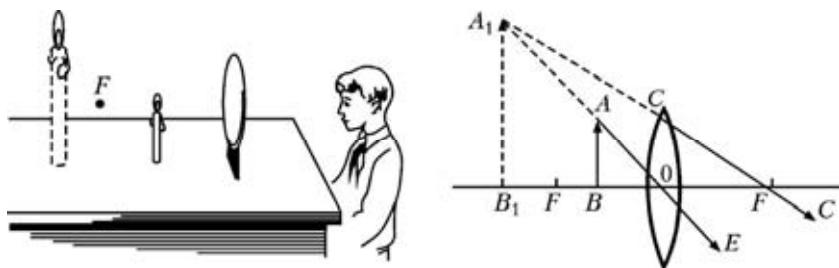


Рис. 24. Получение увеличенного изображения при расположении объекта ближе фокусного расстояния

Получаем изображение – увеличенное, мнимое, прямое и расположено оно от линзы дальше, чем предмет. Такое изображение получают с помощью лупы. Оно увеличенное и прямое, поэтому его удобно рассматривать.

2. Предмет находится между фокусом линзы и ее двойным фокусом (рис. 25).

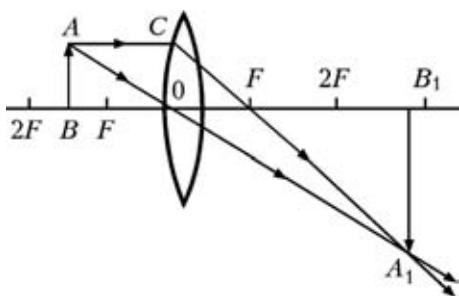


Рис. 25. Получение увеличенного изображения при расположении объекта далее фокусного расстояния

перевернутом виде.

3. Предмет находится за двойным фокусным расстоянием линзы (рис. 26).

Получаем уменьшенное, перевернутое действительное изображение, лежащее по другую сторону линзы между ее фокусом и двойным фокусом. Такое изображение используется в фотоаппаратах.

Получаем увеличенное, перевернутое действительное изображение, расположенное по другую сторону от линзы по отношению к предмету, за двойным фокусным расстоянием. Такое изображение используется в проекционном аппарате (например, в кинотеатре). Чтобы изображение на экране было прямым, диапозитив в аппарате устанавливается в перевернутом виде.

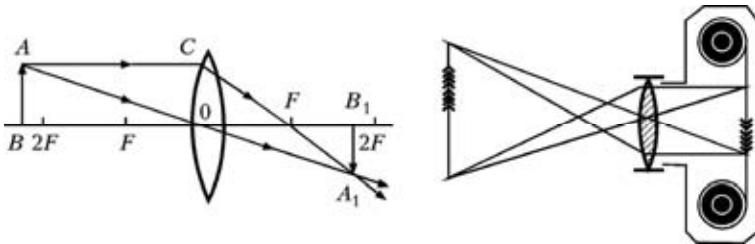


Рис. 26. Получение уменьшенного изображения при расположении объекта далее двух фокусных расстояний

При визуально-оптическом контроле применяют следующие лупы.

*Складные лупы ЛПК-470 и ЛПК-471* предназначены для контроля деталей с относительно большой поверхностью. Осмотр можно проводить двумя глазами, что повышает достоверность контроля. Они дают увеличение до 2, имеют фокусное расстояние 199,4 мм, расстояние от поверхности лупы до объекта 140...150 мм, расстояние от поверхности лупы до глаз 100...700 мм, световой диаметр (размер окна) ЛПК-470 50x95 ЛПК 471 диаметр 78 мм.

В качестве обзорных используют также бинокулярные налобные лупы БЛ-1 и БЛ-2 с увеличением 1,5...2. Бинокулярные лупы предназначены для осмотра объектов двумя глазами. Благодаря стереоскопичности эти лупы позволяют рассматривать объекты объемно, что невозможно в монокулярную лупу.

*Складные карманные лупы* по ГОСТ 25706-83 с увеличением 2,5...7 используют в основном для поиска дефектов, лупы с увеличением 7...20 – для анализа обнаруженных дефектов, а также для поиска дефектов на небольших участках поверхности.

Лупы ЛП-1, ЛА-3, ЛАН-4 в зависимости от конкретного типа дают увеличение 2,5...16, имеют фокусное расстояние 15,6...1000 мм, линейное поле зрения 6,5...95 мм, расстояние от предмета до поверхности линзы 7...98 мм.

Лупы ЛП-1 простые однолинзовые, ЛА-3 – апланатические, склеенные из трех линз, ЛАН-4 – анастигматические, склеенные из четырех линз. У последних типов луп хорошо скорректирована оптика, что дает возможность получать изображение хорошего качества.

Из табл. 24 видно, что фокусные расстояния луп и их рабочие расстояния приблизительно одинаковые, а диаметр поля зрения меньше фокусного расстояния. Линейное поле 2у с удовлетвори-

тельным качеством изображения для одиночной линзы не превышает  $2f'$ .

**Таблица 24. Основные параметры луп**

Назначение	Увеличение	Фокусное расстояние, мм	Свободный световой диаметр линзы, мм	Линейное поле линзы, мм	Рабочее расстояние, мм
Общего назначения	2,5	100	36	95	98
	4	62,5	29	45	54
	6	41,7	22	30	35
	7	35,7	20	25	33
	10	25	13	15	21
	10	25	8	12	13
	20	12,5	6	6	10
	16	15,6	5	6,5	7
	25	10	3,7	4	3
Измерительные	10	25	26	17	17,5
	10	25	13	16	21,5

Здесь рабочее расстояние – это расстояние до предмета от поверхности линзы, мм.

Измерительные лупы обычно имеют сетку со шкалой, цена деления которой равна 0,1 мм.

Сначала надо использовать лупу с небольшим увеличением и большим полем зрения, а затем лупу с большим увеличением для уточнения информации.

*Лупу следует держать так, чтобы ее плоскость была параллельна поверхности контролируемого изделия и как можно ближе к глазу, так как при этом глаз воспринимает наибольшее количество информации.*

Для устранения хроматической aberrации (цветного обрамления) лупы с достаточно большим увеличением должны быть составными. Они обычно представляют собой дуплет или триплет, склеенный из оптических стекол разных марок. Так, лупа Штейнгеля (рис. 27,а) состоит из двояковыпуклой кроновой линзы и двух отрицательных флинтовых менисков. Такая лупа имеет увеличение 6...12,5 и угловое поле  $20^0$ . Более совершенными лупами с большим увеличением 10...40 являются четырехлинзовые анастигматические системы, т.е. системы, в которых исправлены астигматизм, кривизна поля, сферическая и хроматическая aberrации и кома.

Путем увеличения числа линз и применением различных сортов стекла удается получить большие поля зрения (рис. 27,*б*).

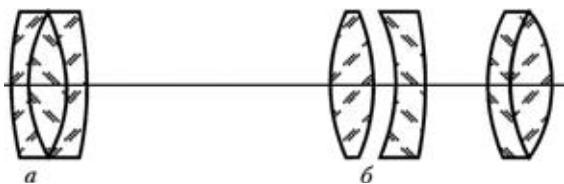


Рис. 27. Устройство сложной лупы: *а* – апаланат; *б* – анастигмат

Международный стандарт ISO/FDIS 3D 58–1997 классифицирует лупы и дает следующие их обозначения:

1. Одноэлементные – с увеличением до 4 (тип А).
2. Многоэлементные – с увеличением до 10 (тип В).
3. Стереоскопические.
  - 3.1. Бинокулярные, обычно с большим рабочим расстоянием (тип С.1).
  - 3.2. Двуокулярные (тип С.2).
4. Увеличители в виде вогнутого зрения с отражателем – с увеличением до 6 (тип D).

Этот стандарт рекомендует придерживаться увеличений в соответствии с табл. 25.

#### Таблица 25. Зависимость между полем зрения, рабочим расстоянием и увеличением

Увеличение	Поле зрения, мм	Рабочее расстояние, мм
2	125	140
4	65	62
8	18	31
10	14	25
15	10	13

При использовании луп надо следить за тем, чтобы объект контроля, так и поверхность, на которой он размещен, должны иметь примерно одинаковую отражательную способность.

Направление освещения должно определяться отражательной способностью контролируемой поверхности, а изменение освещенности от периферии поля зрения до его центра не должно превышать 1:3. Лупы являются основным инструментом при визуальном контроле.

## 4. Телескопические системы, их устройство

При визуальном контроле далеко расположенных поверхностей используются телескопические системы трубы, бинокли и т.п. Здесь параллельный пучок излучения, поступающий в их входной зрачок, преобразуют в параллельный, более узкий пучок излучения, выходящий через выходной зрачок системы. Фокусы таких систем находятся в бесконечности, а оптическая сила равна нулю. Такие системы называются *афокальными*.

Сложная телескопическая система (рис. 28), кроме двух составляющих основных оптических частей положительных объектива и окуляра (труба Кеплера) и положительного объектива и отрицательного окуляра (труба Галилея), может иметь ряд других оптических деталей: защитные стекла, сетки, призмы, оборачивающие и фокусирующие системы, светофильтры и т.р. Конструктивно эти детали могут быть отнесены как к объективной, так и к окулярной части.

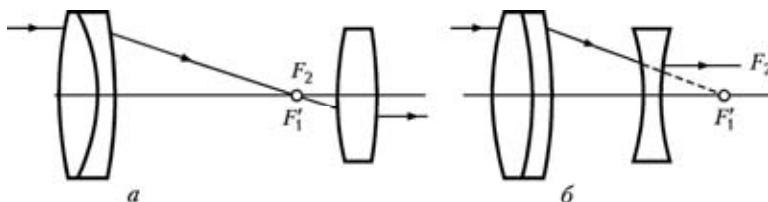


Рис. 28. Устройство зрительных труб: *а* – Кеплера; *б* – Галилея

Для телескопической системы в воздухе:

$$\text{видимое увеличение } \Gamma = \frac{f'_1}{f'_2} = \frac{D}{D'};$$

$$\text{продольное увеличение } \alpha = \frac{1}{\Gamma^2};$$

где  $f'_1$  и  $f'_2$  – соответственно фокусные расстояния объектива и окуляра;  $D$  и  $D'$  – диаметры входного и выходного зрачков.

Из последнего соотношения видно, что в телескопических системах все предметы кажутся приближенными к наблюдателю, а само пространство изображений – сжатым в направлении линии наблюдения. Видимое, угловое, поперечное и продольное увеличения телескопической системы не зависят от расстояния до предмета.

Разрешающая способность телескопической системы определяется разрешающей способностью объектива.

Угловой предел разрешения для реального объектива подсчитывается по формуле:

$$\varphi \approx 150'' / D.$$

Таким образом, угловой предел разрешения объектива телескопической системы зависит от диаметра входного зрачка.

Схема трубы Галилея используется в основном в биноклях, телескопических бинокулярных лупах небольшого увеличения 2...8 с полем зрения 20...5°.

Основные преимущества трубы Галилея: прямое изображение, простота конструкции; длина этой трубы короче на два фокусных расстояния окуляра по сравнению с подобной трубой Кеплера и малые потери яркости (10...15 %), что позволяет применять ее при плохом освещении.

Труба Галилея имеет ряд недостатков: небольшое поле и увеличение; отсутствие действительного изображения и поэтому невозможность измерений.

*Стереоскопические и бинокулярные системы.* Наблюдение в бинокулярные трубы уменьшает утомление глаз и облегчает глубинное восприятие. При наблюдении в бинокулярную зрительную трубу радиус стереоскопического зрения увеличивается во столько раз, во сколько раз база  $B$  трубы, т.е. расстояние между объективами, больше базы  $b$  глаз. Отношение  $B$  к  $b$  называется *удельной пластикой*. Восприятие глубины также возрастает, а параллактический угол уменьшается пропорционально увеличению бинокулярной трубы. Произведение удельной пластики на увеличение называется *полной пластикой*.

На рис. 29 показана стереоскопическая лупа, предназначенная для выполнения достаточно тонких зрителевых работ. Лупа дает стереоскопическое изображение предмета: увеличение – 2, расстояние до рассматриваемого предмета – 182 мм, диаметр поля зрения – 30 мм.

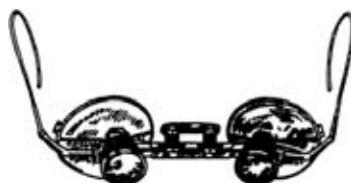


Рис. 29. Лупа стереоскопическая бинокулярная

Стереоскопические приборы всегда бинокулярные, однако, бинокулярные приборы могут быть и не стереоскопическими.

## 5. Микроскопы

На рис. 30 приведена схема оптической системы микроскопа, состоящая из объектива 1 и окуляра 2, с указанием расположения главных плоскостей, фокусов и фокусных расстояний, а также расстояния между ее компонентами.

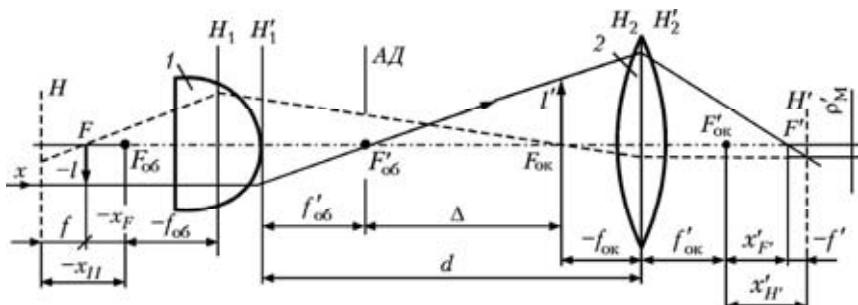


Рис. 30. Оптическая схема микроскопа

Из теории оптических систем известно, что действие всех преломляющих, а также отражающих поверхностей оптической системы или отдельных ее деталей, можно представить действием некоторой пары условно сопряженных плоскостей, линейное увеличение в которых  $\beta = +1$ . Одну из этих плоскостей называют *задней главной плоскостью оптической системы*, а точку  $H'$  пересечения ее оптической осью – *задней главной точкой оптической системы*.

На рис. 30 с целью упрощения рисунка объектив и окуляр заменены простыми линзами.

К основным характеристикам микроскопа относят видимое увеличение  $\Gamma_m$ , линейное поле в пространстве предметов  $2l$  и диаметр выходного зрачка  $2\rho_m$ .

По отношению ко всему микроскопу рассматриваемый предмет расположен в передней фокальной плоскости и видимое увеличение микроскопа можно определить так же, как и лупы отношением  $\Gamma_m = 250/f'$ , где  $f'$  – заднее фокусное расстояние микроскопа в мм.

Апертуру микроскопа определяют по формуле:

$$A = n \sin \delta_A,$$

где  $\delta_A$  – входной апертурный угол;  $n$  – показатель преломления иммерсионной жидкости, иногда помещаемой между рассматриваемым предметом и микрообъективом.

*Глубина изображения в микроскопе.* Как уже было отмечено, глаз наблюдателя может менять аккомодацию от своей ближней точки до дальней с объемом аккомодации 4 дптр.

Для лупы и микроскопа аккомодационная глубина в пространстве предметов, сопряженная с границами области аккомодации невооруженного глаза, может быть вычислена по формуле:

$$T_a = \frac{250}{\Gamma_M^2} = 0,004 f^2.$$

Геометрическая глубина резкого изображения оценивается выражением:

$$T_\Gamma = \frac{250\varepsilon}{A\Gamma_M},$$

где  $\varepsilon$  – угловой предел разрешения глаза. Явление дифракции в микроскопе увеличивает глубину резкости на величину:

$$T_B = \frac{n\lambda}{2A^2},$$

где  $n$  – показатель преломления иммерсионной жидкости;  $\lambda$  – длина волн света, в котором проводится наблюдение.

Полная глубина резкости определяется суммой:

$$T = T_\Gamma + T_B + T_a.$$

В случае проектирования изображения на экран или матовое стекло, а также в микроскопах, в которых используется окуляр с сеткой  $T_a = 0$ .

Первый член суммы можно оценить по соотношениям:

$$T_\Gamma = \frac{340n}{A\Gamma_M} \text{ мкм или } T_\Gamma = \frac{1}{7A\Gamma_M} \text{ мм..}$$

*Разрешающая способность микроскопа.* Согласно дифракционной теории Аббе это линейный предел разрешения микроскопа, т.е. минимальное расстояние между точками предмета, которые изображаются как раздельные

$$\delta = \lambda / (2A).$$

Нижний предел разрешаемости объектов, наблюдаемых в микроскоп, равен 0,18 мкм. Для полного использования разрешающей способности микроскопа, определяемой последней формулой, необходимо, чтобы увеличение всей системы микроскопа в видимой области спектра находилось в пределах

$$500 A < \Gamma_m < 1000 A.$$

Значения  $\Gamma_m$ , удовлетворяющие этому неравенству, называются *значениями полезного увеличения микроскопа*.

Увеличение, превышающее высший предел полезного увеличения и получаемое применением окуляра с меньшим фокусным расстоянием, бесполезно, поскольку при этом не представляется возможным выявить никаких новых деталей предмета по сравнению с тем, какие различаются при полезном увеличении.

*Оптическая и механическая длина тубуса.* В микроскопе различают оптическую и механическую длину тубуса  $\Delta$  – это расстояние от заднего фокуса объектива микроскопа до переднего фокуса окуляра (см. рис. 30); для различных объективов эта величина различна. Чем длиннофокуснее объектив, тем меньше его оптическая длина и наоборот. Механическая длина тубуса – расстояние от опорной плоскости объектива до верхнего среза тубуса стандартизирована и принимается равной 160 мм для микроскопов, применяемых для наблюдения в проходящем свете, и 190 мм в микроскопах для наблюдения в отраженном свете.

*Объективы и окуляры микроскопов.* Оптическая схема микробольфетива тем сложнее, чем выше его апертура и увеличение и чем совершеннее коррекция остаточных aberrаций.

По степени коррекции объективы классифицируют на монохроматы, ахроматы и апохроматы. У первых aberrации направлены для одной длины волн или узкой спектральной области. Если ахроматизация выполнена для двух длин волн – это ахроматы. У апохроматических объективов спектральная область расширена для трех длин волн.

Объективы современных микроскопов имеют увеличение от 1 до 120 и числовую апертуру от 0,01 до 1,4. Объективы-ахроматы с увеличением от 5 до 10 и апертурой до 0,2 состоят из двух двухлинзовых склеенных компонентов. Объективы-монохроматы – имеют увеличение до 90...100 и апертуру до 1,3 при глицериновой иммерсии.

#### *Компоновка микроскопа.*

Компоновка оптических и механических узлов в большинстве микроскопов всех типов, за исключением металлографических, в общих чертах одинакова. На рис. 31 показан в разрезе один из наиболее распространенных микроскопов и дана схема хода лучей. Штатив микроскопа имеет предметный столик 6, под которым находится конденсор 7. Тубусодержатель 2 несет тубус 3 с окуляром 4 и револьвер с объективами 5. Фокусировка микроскопа проводится передвижением тубусодержателя с помощью грубого и микрометрического механизмов 1. Зеркало 8 направляет свет в конденсатор микроскопа.

В зависимости от свойств изучаемого объекта и задач исследования существуют различные методы наблюдения, дающие несколько отличающиеся изображения объекта.

Метод светлого поля в отраженном свете применяют для наблюдения непрозрачных объектов, например, шлифов металлов, сплавов,рудных минералов.

Структура поверхности металла видна вследствие различия отражательной способности его элементов. Поверхность объекта контроля 1 (рис. 32) освещается через объектив 2

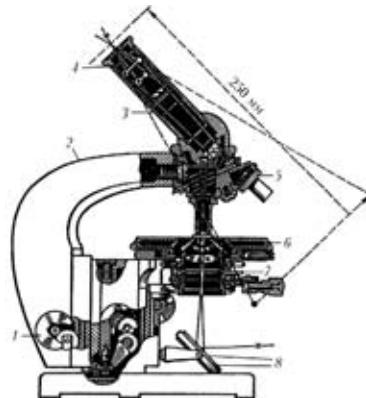


Рис. 31. Устройство микроскопа

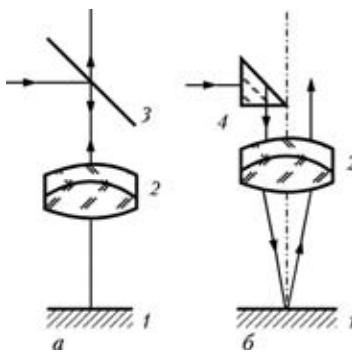


Рис. 32. Метод светлого поля в отраженном свете:  
а – с полупрозрачной пластиной 3;  
б – с призмой 4; 1 – исследуемая поверхность; 2 – объектив

(выполняющий одновременно роль конденсора) с помощью опак-иллюминатора, в котором устанавливается полупрозрачная пластина 3 или призма 4.

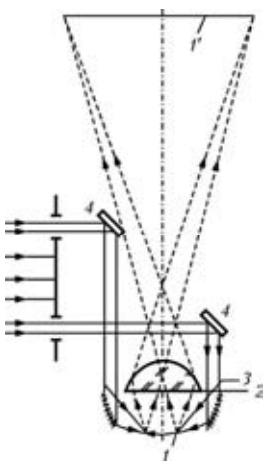


Рис. 33. Метод темного поля в отраженном свете: 1 – исследуемая поверхность; 2 – объектив; 3 – эпиконденсор; 4 – кольцевое зеркало

используемые в цеховых условиях, имеют увеличение порядка 40, поле зрения около 5 мм, разрешающую способность  $\sim 3,5$  мкм. Их используют при контроле поверхностей, имеющих гальваническое покрытие, окрашенных и полированных поверхностей, для обнаружения мелких трещин, пузырей и других дефектов, для измерения небольших отверстий в штампах, шаблонах и т.п.

Измерительные микроскопы используются для точных измерений линейных размеров объекта. При этом возможны два способа измерений:

1) измеряется непосредственно величина изображения объекта в фокальной плоскости окуляра с помощью шкалы или винтового окулярного микрометра, а затем по известному значению увеличения микроскопа вычисляется измеряемое расстояние на объекте;

2) микроскоп используется для наводки на интересующие места объекта, а расстояние между ними определяется по относительному перемещению микроскопа и объекта. Точность измерения

Метод темного поля в проходящем свете применяют в биологии, главным образом для наблюдения прозрачных неабсорбирующих объектов, невидимых при методе светлого поля. Метод темного поля в отраженном свете (рис. 33) осуществляется при освещении объекта 1 (например, шлифа металла) сверху с помощью зеркал 4 и специальной кольцевой системы 3, расположенной вокруг объектива и называемой эпиконденсором. Изображение 1' здесь создается только лучами, рассеянными объектом (штриховые линии).

Рабочие микроскопы,

линейных размеров от 0,01 до 0,001 мм, угловых – 1...10', предел измерения линейных величин 50...200 мм.

Стационарные и портативные микроскопы металлографические используются для исследования микроструктуры металлов и других непрозрачных объектов. Изучаемую поверхность предварительно полируют и протравливают, благодаря чему зерна структуры становятся отличными друг от друга.

Набор объективов обеспечивает общее увеличение микроскопа при визуальном наблюдении от 100 до 1350, при фотографировании от 45 до 2000 крат.

Фазово-контрастная микроскопия используется для наблюдения прозрачных непоглощающих объектов, которые отличаются от окружающей среды показателями преломления или толщиной. Вследствие этого различия световая волна, прошедшая сквозь объект, претерпевает изменения по фазе и приобретает фазовый рельеф. Фазовые изменения, не воспринимаемые непосредственно глазом или фотопластинкой, с помощью специальной фазовой пластиинки (фазового кольца) переводят в амплитудные изменения (амплитудный рельеф), воспринимаемые глазом как изменения интенсивности.

Объект 3 в фазово-контрастном микроскопе (рис. 34) освещается через кольцевую апертурную диафрагму 1, установленную на переднем фокусе конденсора 2. Изображение ее получаем в заднем фокусе объектива 4, где помещается прозрачная пластиинка 5 с фазовым кольцом, размеры которого равны размерам изображения диафрагмы. Фазовое кольцо представляет собой вытравленную в пластиинке канавку или нанесенную на нее тонкую пленку.

Метод фазового контраста применяется в отраженном свете для изучения микронеровностей, загрязнений, нарушений структуры на полированных металлических образцах.

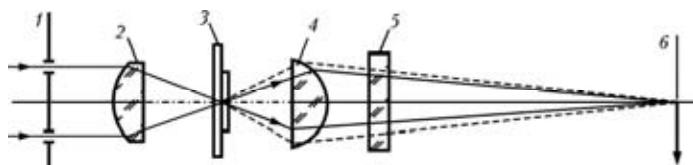


Рис. 34. Метод фазового контраста в проходящем свете:  
1 – апертурная диафрагма; 2 – конденсор; 3 – объект; 4 – объектив;  
5 – фазовая пластина; 6 – изображение

Метод интерференционного контраста состоит в том, что каждый луч, входящий в микроскоп, раздваивается: один проходит сквозь наблюдаемую частицу, второй – мимо. В окулярной части микроскопа оба луча вновь соединяются и интерферируют между собой.

Интерференционная микроскопия используется для измерения и контроля тончайшей полировки поверхностей, когда степень шероховатости составляет несколько микрометров, точность измерений достигает  $(1/300)\lambda$ .

Поляризационная микроскопия используется для исследования анизотропных объектов в поляризационном свете (проходящем и отраженном). У прозрачных объектов во многих случаях наблюдают интерференционные явления, которые изучаются либо в параллельных лучах (ортоскопия), либо в сходящихся лучах (коноскопия).

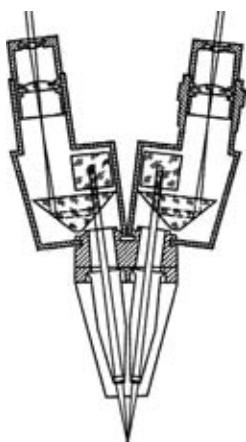


Рис. 35. Схема стереомикроскопа

Стереоскопическая микроскопия позволяет видеть предмет объемным за счет рассматривания его каждым глазом под разными углами. В стереомикроскопах по схеме Грену (рис. 35) для этой цели служат две самостоятельные оптические системы, образующие между собой угол  $15^0$ , что соответствует расстоянию конвергенции 250 мм.

В однообъективных стереомикроскопах разные углы зрения для глаз образуются за счет использования периферических зон выходного зрачка. В приборах этого типа с помощью дополнительной оптической системы возможно получение ступенчатого или плавного изменения увеличения без замены объектива и окуляров. Типичный диапазон увеличений в стереомикроскопах от 4 до 100 при рабочем расстоянии около 100 мм, при 10 – поле зрения около 25 мм.

Телевизионная микроскопия позволяет наблюдать микрообъекты на телевизоре. Микроскопы этого типа построены на основе схемы с передающей трубкой либо схемы с бегущим лучом. В телевизионных микроскопах с передающей трубкой (рис. 36, а) объект 3 освещается источником света 1 через конденсор 2. Микрообъектив 4 и окуляр 5 создают действительное изображение препарата на фотослое передающей трубы 6, откуда изображение в виде

электрического сигнала передается через электронную систему 7 на кинескоп 8, где преобразуется в видимое изображение. Если ОК освещать последовательно светом трех длин волн или изображение одновременно проецировать на три передающие трубки, то, передав сигналы с трубок на трехцветный кинескоп, можно получить на экране цветное изображение микрообъекта.

В телевизионном микроскопе (рис. 36,б) используется оптическое сканирование ОК движущимся лучом света. В этом случае микроскоп, состоящий из объектива 3 и окуляра 2, работает в обратном ходе лучей и проецирует на объект 4 сильно уменьшенное изображение раstra катодно-лучевой трубы 1, служащей источником света (источником света может быть и лазер с быстродействующим сканирующим устройством). Приемником света является фотоумножитель 6,

установленный под конденсором 5. При такой схеме точки ОК освещаются последовательно по мере движения луча, а интенсивность прошедшего света пропорциональна пропусканию той точки препарата, где находится бегущий луч. Выходной сигнал с фотоумножителя, пропорциональный интенсивности прошедшего света, пройдя через электронную систему 7, управляет током электронного луча кинескопа 8. В результате на экране кинескопа воспроизводится изображение ОК. Телевизионные микроскопы позволяют чисто электронным путем менять масштаб, контраст и яркость изображения. Достоинством телевизионной микроскопии является возможность дистанционно наблюдать объекты (например, радиоактивные).

Акустическая микроскопия основана на проникновении ультразвуковых или гиперзвуковых волн в твердые тела и на изменении параметров этих волн в зависимости от физико-механических свойств объектов. Существует несколько способов ввода и регистрации акустических волн: линзовье, фототермоакустические и лазерные. В простейшем акустическом микроскопе ультразвуковая

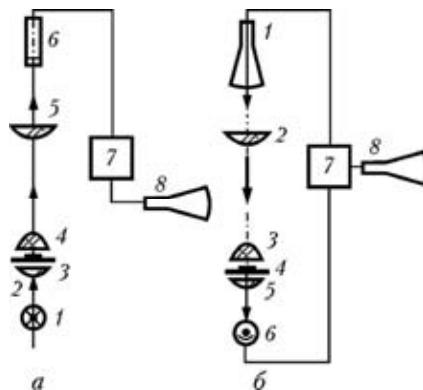


Рис. 36. Схема телевизионного микроскопа:  
а – с передающей трубкой;  
б – с бегущим лучом

волна генерируется пьезопреобразователем, а затем входит в изделие через линзу и иммерсионную жидкость. Сфокусированный пучок частично отражается и рассеивается от объекта, а частично проходит сквозь него.

Если с помощью той же линзы принимать отраженный сигнал, то реализуется микроскоп, работающий на отражение (рис. 37). Если фиксировать прошедшее излучение другой линзой, то получится трансмиссионный микроскоп (микроскоп, работающий на прохождение).

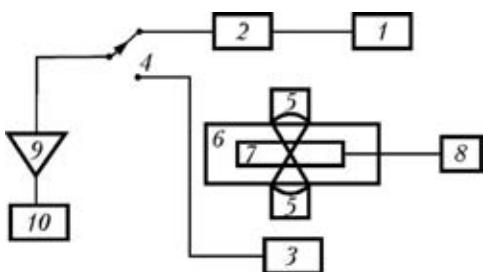


Рис. 37. Схема акустического микроскопа:  
 1 – генератор зондирующих эмиттрических импульсов; 2 – излучающий (и принимающий в режиме отражения) пьезопреобразователь; 3 – принимающий (в режиме просвечивания) пьезопреобразователь; 4 – переключатель режима работы; 5 – акустические линзы; 6 – жидкость; 7 – объект контроля; 8 – механизм сканирования; 9 – блок усиления и детектирования; 10 – блок обработки и визуализации сигналов

при  $f_{раб} = 100$  ГГц. Поверхностная 0,2...0,05 мкм на частоте 375 МГц.

Изображение структуры при  $f_{раб} = 100$  МГц можно получать с глубин до 1 мм, а при  $f_{раб} = 1$  ГГц – с глубин до 5 мм. В качестве иммерсионной жидкости можно использовать жидкие металлы с большим атомным номером (например, ртуть), это повышает амплитуду сигналов в несколько раз.

Фототермоакустическая микроскопия основана на воздействии на образец электромагнитного излучения, при этом в образце возникают тепловые и акустические волны. Эти волны регистрируют-

С помощью линзовых микроскопов исследуют пористость металлов, их однородность, структуру, выявляют расслоения, измеряют толщины слоев, анализируют физические свойства (используя рассеяние и возмущение волн на неоднородностях плотности, упругости, вязкости и т.д.).

Поверхностное разрешение микроскопов составляет около 0,6 мкм на частоте  $f = 2$  ГГц, а при использовании в качестве иммерсионной жидкости сверхтекущего гелия (у которого  $c = 240$  м/с) оно доходит до 5 нм способность составляет

ся, обрабатываются и по ним восстанавливают внутреннее изображение объекта с большой точностью. Регистрацию ведут микрофонами, пьезодатчиками, интерферометрами, координатными приемниками, терморезисторами, фотодиодами, фотосопротивлениями.

Фототермоакустические микроскопы используются для обнаружения внутренних неоднородностей, для контроля структуры и химического состава изделий.

При использовании лазерных акустических микроскопов возбуждение акустических колебаний происходит с помощью импульса мощного лазера, а регистрация – с помощью интерферометра на малоощущенном лазере.

Возможна комбинация различных способов излучения и приема ультразвуковых волн.

Акустическая микроскопия, как и все способы микроскопического анализа, предназначена в основном для качественных исследований. Информация, содержащаяся в амплитудных и фазовых акустических микрофотографиях, отражает специфические свойства исследуемого объекта и является, как правило, морфологической.

Она может использоваться для классификации и сортировки материалов, обнаружения и локализации трещин и дефектов, а также для выявления на микроскопическом уровне распределения физических свойств материалов (плотности, объемной сжимаемости, прочности, твердости, зернистости, пористости и т.д.).

## XII. СРЕДСТВА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ НЕДОСЯГАЕМЫХ ЗОН

Зеркала – наиболее простые средства контроля недоступных зон объектов контроля. Зеркала могут иметь достаточно длинные и гибкие державки. Источники подсветки располагаются отдельно. При известном умении можно осветить обследуемую поверхность при помощи света, проникающего из внешней среды и отражаемого зеркальцем (рис. 38).

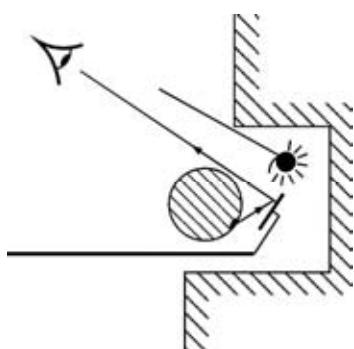


Рис. 38. Использование зеркал для осмотра недоступных мест

Используемые зеркала могут быть плоскими или слегка вогнутыми. В последнем случае они дают определенное увеличение обследуемой зоны. Различные приборы применяют для дефектоскопии объектов, физически недоступных для глаз наблюдателя – скрытых или удаленных деталей, посторонних предметов внутри закрытых конструкций.

Телескопические приборы позволяют получить увеличение до 20...30 крат. К телескопиче-

ским приборам относятся различные эндоскопы, бороскопы. Оптическая система эндоскопа состоит из телескопической системы и плоского зеркала или призмы, размещаемых перед объективом и отклоняющих лучи на определенный угол (рис. 39, а). В зависимости от назначения и направления, в котором должен проводиться осмотр, эндоскопы бывают:

- отклоняющие под прямым углом (90 град.);
- отклоняющие под косым углом (менее 90 град.);
- обратного визирования (более 90 град.);
- панорамного видения (под углом 180 град., поперечный);
- с увеличением более 2 крат.

Применяют различные специализированные эндоскопы.

*Цистоскопы* применяют для осмотра полостей диаметром более 8 мм, глубиной до 200 мм при увеличении 1,1...1,8. Оптическая трубка цистоскопа представляет собой тонкую трубку, внутри которой размещена оптическая система.

*Техноэндоскопы* предназначены для осмотра полостей глубиной до 500 мм. Бронхоскоп М494 позволяет проводить прямое наблюдение глубоких полостей (угол зрения прибора составляет от 162 до 180 град.).

Бронхоскоп М.451 обеспечивает осмотр объектов с изменяющимся углом наблюдения 45...115 град. (рис. 39).

*Перископические устройства* предназначены для осмотра путем бокового обзора внутренней поверхности труб и закрытых конструкций большой длины. Перископический дефектоскоп ПД-60 предназначен для осмотра внутренней поверхности полостей диаметром более 35 мм и глубиной до 900 мм при увеличении 4. Его телескопическая зрительная труба с объективом и подвижным окуляром и прямоугольная оптическая призма, изменяющая направление лучей на 90 град показаны на рис. 39.

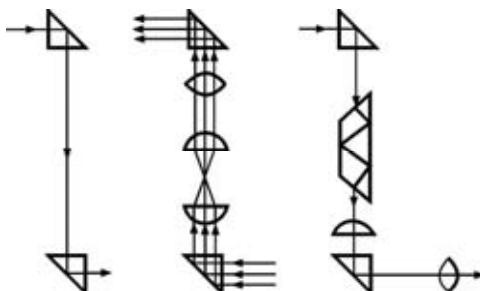


Рис. 39. Оптические схемы бронхоскопов

*Перископический коленчатый дефектоскоп ПДК-60* используется тогда, когда объект невозможно контролировать из-за сложных подходов. Он имеет два колена, изменяющих ход лучей на 90 град (75 град). Объективная часть прибора имеет переменную длину, в средней его части установлена подвижная обраачивающаяся система, перемещением которой вдоль оптической трубы осуществляют настройку на резкость. Оптическая система дефектоскопа ПДК-60 обеспечивает увеличение 0,5...2,5 в зависимости от длины объективной части и расстояния до рассматриваемого объекта. Поле зрения прибора 45...110 мм (см. рис. 39).

Приборы РВП-467, РВП-469, РВП-478 выполнены в виде неразъемных труб, внутри которых расположена обраачивающаяся

система. На одном конце трубы установлены осветитель и объектив, на другом – окуляр (рис. 40).

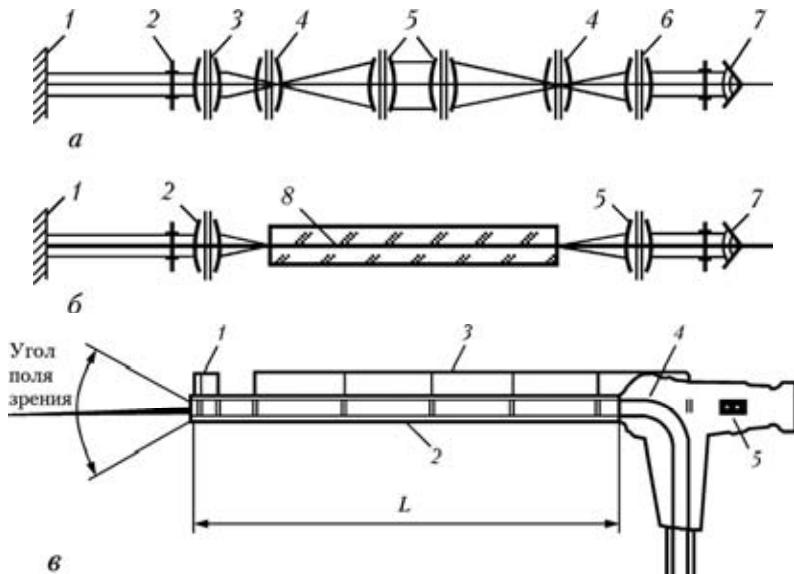


Рис. 40. Схемы оптических смотровых устройств:

*a* – с линзовой оборачивающей системой;

*b* – со стекловолоконным жгутом для передачи изображения: 1 – предмет; 2 – входной зрачок прибора; 3 – объектив; 4 – коллектор; 5 – линзы оборачивающей системы; 6 – окуляр; 7 – глаз наблюдателя;

8 – стекловолоконный жгут;

*6* – структурная схема линзового (жесткого) эндоскопа: 1 – объектив; 2 – металлическая трубка; 3 – система оборачивающих линз; 4 – световод, передающий световую энергию от источника в металлическую трубку для освещения ОК; 5 – окуляр

В конструкции сборно-разборных приборов предусмотрены промежуточные трубы длиной 0,7...3,3 м, внутри которых размещены оборачивающие системы. Это позволяет собирать прибор необходимой длины в зависимости от размеров (протяженности) рассматриваемых конструкций.

Эндоскопы на оптических волокнах – гибкие телескопические приборы, включающие наборы оптических (стеклянных) волокон, световедущую жилу из прозрачного материала с высоким показа-

телем преломления и оболочку из материала с меньшим показателем преломления.

Лучи света, падающие на один торец такого волокна, благодаря полному внутреннему отражению на поверхности раздела жилы и оболочки распространяются вдоль волокон до противоположного торца.

В светофокусирующих волокнах показатель преломления материала изменяется непрерывно по параболическому закону. В таких волокнах потери света уменьшены благодаря отсутствию потерь при каждом отражении от поверхности раздела двух сред – жилы и оболочки. Луч света, падающий на торец волокна, движется вдоль него по некоторой синусоидальной кривой. Для уменьшения потерь света волокна обычно покрывают металлической оболочкой из свинца, алюминия или индия.

Из оптических волокон составляют жгуты, на торцах которых волокна скрепляют методом горячего прессования или склеивают. В осветительных жгутах, предназначенных для передачи света, оптические волокна расположены беспорядочно.

Жгуты для передачи изображения представляют собой сноп волокон с регулярным и идентичным расположением световедущих жил на обоих торцах жгута (см. рис. 40). Каждое волокно несет один элемент изображения. На выходном торце изображение, переданное жгутом, получается мозаичным. Коэффициент светопропускания жгута длиной 500...1500 мм для направленного белого света (угол расхождения 5 град) составляет 25...52 %. Светопропускание лимитируется дискретной структурой волоконных элементов, светопоглащением исходных материалов и геометрией оптических волокон. Разрешающая способность жгутов длиной более 1 м составляет около 12...15 (1/мм), коротких – около 20 (1/мм). Максимальная разрешающая способность длинных жгутов из тонких световодов не превышает 40...45 (1/мм). Повышение разрешающей способности сопровождается снижением коэффициента светопропускания, увеличением степени неравномерности его по полю изображения.

*Гибкие осветительные жгуты типа ГОЖВ* собирают из оптических волокон диаметром 20...50 мкм. Жгуты ГОЖВ-А изготавливают в полихлорвиниловой оболочке с гладкими оправками из коррозионностойкого материала на концах. Жгуты ГОЖВ-Б имеют такую же оболочку и фасонные оправки. Гибкий осветительный жгут ГОЖВ-В имеет защитную оболочку из металлокаркаса и фасонные оправки из коррозионностойкого материала.

В гибких регулярных жгутах ГРЖВ, используемых в конструкции гибких эндоскопов для передачи изображения, в качестве световедущей жилы используют стекло ТК-16, а для светоизолирующей оболочки – стекло ЛК-6.

Гибкий регулярный жгут ГРЖВ-А изготавливается в защитной полихлорвиниловой оболочке с фасонными оправками на концах. Его размеры соответствуют размерам осветительного жгута ГОЖВ-Б для светового диаметра 2...15 мм. Жгут ГРЖВ-В имеет оболочку из металлического кабеля и фасонные оправки. Его размеры соответствуют размерам осветительного жгута ГОЖВ-В для светового диаметра 2...15 мм.

Общая длина 1030 мм, полезная – 870 мм, диаметр наконечника 6...14 мм, разрешающая способность 25...31 1/мм, угол обзора 35...50<sup>0</sup>, максимальная длина эндоскопа 2,5...5 мм.

Существуют особо тонкие гибкие эндоскопы диаметром 3 мм. Жгуты таких эндоскопов собираются из волокон диаметром 12 мкм, что обеспечивает разрешающую способность приборов 37 1/мм. Полная длина эндоскопов 1000...1500 мм, полезная – 830...1300 мм.

Осмотр внутренних полостей изделий через криволинейные вводные каналы возможен гибкими стекловолоконными смотровыми приборами – файберскопами, а в некоторых случаях линзовыми приборами с шарнирными сочленениями.

Файберскопы выполняются в вариантах прямого и бокового наблюдения, концевую его часть можно изгибать на ± 120<sup>0</sup>. Эти приборы снабжены фотокамерами.

Жаростойкие эндоскопы предназначены для контроля горячих частей объектов контроля и могут работать при температуре до 1200 °C. Эти эндоскопы охлаждаются проточной водой. Общая длина – 1033 мм, полезная длина – 800 мм, диаметр наконечника – 12 мм, разрешающая способность – 31 1/мм, максимальная температура при длительной работе – 800 °C, максимальная температура при кратковременной работе до 20 мин – 1200 °C. Расход охлаждающей воды – 1 л/мин.

По принципам сканирования обзорно-поисковые сканирующие устройства разделят на:

- устройства поэлементного сканирования – в них сканирование осуществляется в любой последовательности по каждому элементу поля зрения;
- устройства последовательно-зонального сканирования – в них сканирование носит не дискретный характер, а непрерывный – это

- телевизионные системы, в которых развертка изображения осуществляется с помощью непрерывно перемещающегося луча;
- устройство параллельно-зонального сканирования – в них сканирование осуществляется одновременно с помощью двух взаимно-перпендикулярных щелей. Каждая щель имеет свой светочувствительный элемент и свой канал передачи информации. Эти устройства не позволяют воспроизводить полное изображение сканируемого объекта.

По принципу действия сканируемые устройства бывают следующие.

*Оптико-механические* – в которых используются подвижные сканирующие элементы отражающей и преломляющей оптики – зеркала (плоские, сферические, параболические и др.), клинья, многогранные барабаны, линзы, призмы и т.д. Эти элементы совершают вращательное, колебательное или возвратно-поступательное движения.

*Оптико-электрические* – в которых воспринимающим элементом являются один или несколько фотоприемников.

*Полупроводниковые* – имеют простую схему и не сложное исполнение. Эти устройства весьма перспективны.

*Фотоэлектронные вакуумные* – состоят из передающих телевизионных трубок, специальных передающих трубок, трубок прямого вибрации и т.д. Чувствительность этих устройств самая высокая.

*Волоконно-оптические*, которые позволяют осуществить разделение изображения, изменить его формат.

Современный серийный эндоскоп является универсальным оптико-механическим прибором, обеспечивающим любой вид визуальной диагностики и контроля внутри закрытого пространства на значительную глубину (практически до 30 м).

Распространены также линзовье и комбинированные эндоскопы. Оптическая схема типичного линзового эндоскопа показана на рис. 40,в. Эндоскопы этого типа снабжаются системой фокусировки, позволяющей получать качественное изображение анализируемого участка ОК как в ближней, так и в дальней зоне. Управляя поворотной ручкой, можно поворачивать трубку на угол более  $360^0$  и легко изменять анализируемый участок ОК.

Разнообразные приборы рассматриваемого типа можно получить за счет направления визирования эндоскопа (рис. 41). Обычно диаметр и эффективная длина трубки находятся в пределах 0,5...5 крат. Водонепроницаемая конструкция трубки эндоскопа позволяет

вести контроль в воде и в масле. Линзовыми эндоскопами можно контролировать стены зданий, поверхности разнообразных трубопроводов, авиационные двигатели и т.п. Обнаруживаются царапины, трещины, коррозионные пятна, выбоины и другие дефекты размерами 0,03...0,08 мм в изделиях длиной 10 м и диаметром 5...100 мм и более.

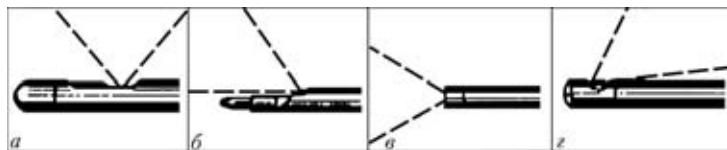


Рис. 41. Типы направления визирования эндоскопа: *а* – боковой; *б* – косоприцельный; *в* – прямонаправленный; *г* – ретроспективный

Линзовые эндоскопы обычно представляют собой жесткую конструкцию. Но уже созданы приборы, имеющие участки корпуса с гибкой оболочкой, изгибающиеся в пределах 5...10°.

*Минибороскоп*. В минибороскопе набор оборачивающих линз заменен твердым волокном, в котором значение показателя преломления от центра волокна к периферии изменяется по параболическому закону, что позволяет такому волокну через определенные интервалы его длины формировать изображения, т.е. действовать как система оборачивающих линз (рис. 42).

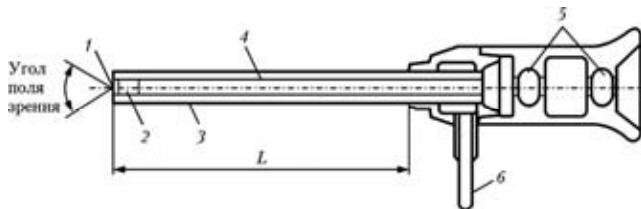


Рис. 42. Структурная схема минибороскопа: *1* – защитное стекло; *2* – широкоугольный объектив из селфока; *3* – трубка из нержавеющей стали; *4* – стержневая линза из селфока; *5* – окуляр; *6* – световод для освещения ОК

Модификации минибороскопа могут быть изготовлены по трем направлениям визирования: с прямонаправленным обзором ( $0^0$ ), косоприцельным ( $14^0$ ), боковым ( $90^0$ ). Такие бороскопы при рабочих температурах могут быть использованы для контроля литья,

осмотра внутренних поверхностей тонких трубок, контроля износа сопел и др.

Коэффициент пропускания световодов составляет примерно 40...50 % на 1 м длины.

Спектр пропускания световода определяется свойствами материала, из которого он изготовлен. Обычные световоды из стекла прозрачны в области 0,4...2 мкм.

Для работы в ультрафиолетовой области используют кварцевые волокна, прозрачные в диапазоне 0,2...4 мкм.

В инфракрасном диапазоне (0,9...10 мкм и более) применяют волокна из специальных халькогенидных бескислородных стекол.

Для передачи изображения используют пучок волоконно-оптических элементов с упорядоченной структурой. При этом число элементарных волокон может превышать  $10^6$  на 1 см<sup>2</sup> при диаметре волокон 9 мкм. Торцы световодов полируют. Такой пучок передает изображение, сформированное линзами объектива, на окуляр (рис. 43). При использовании световодов следует иметь ввиду, что они могут сильно деполяризовать проходящий свет. Разрешающая способность серийных световодов составляет в среднем 15...20 мм<sup>-1</sup>. Лучшие образцы могут иметь разрешающую способность до 50 мм<sup>-1</sup>. Волоконные световоды позволяют передавать изображение без искажения при их изгибе по любому криволинейному профилю. Высокая световая эффективность световодов используется при создании осветительных систем эндоскопов. При этом источник света располагается вне прибора, что позволяет исключить нагрев изделия (рис. 43).

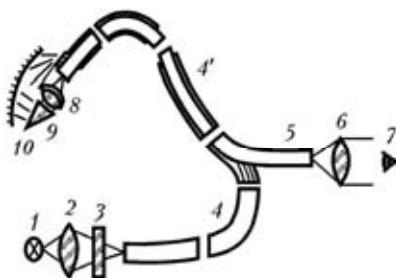


Рис. 43. Оптическая схема гибкого эндоскопа (фибрископа): 1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – тепловой фильтр; 4 – внешний осветительный светодиод; 5 – информационный светодиод; 6 – окуляр; 7 – система регистрации и(или) анализа изображений (глаз, фотокамера, передающая телевизионная трубка); 8 – дистальная часть эндоскопа; 9 – оптический адаптер (призма); 10 – поверхность ОК

Заменяя оптические адAPTERы, можно подобрать угол зрения (в пределах  $10\dots 120^0$ ), направление визирования (прямой или боковой обзор) и глубину наблюдения (2 мм ...  $\infty$ ).

Самые яркие изображения получают эндоскопами малой длины и большого диаметра. При увеличении длины эндоскопа изображение становится менее ярким из-за потерь света в дополнительных оптических элементах, устанавливаемых для передачи изображения на достаточно большие расстояния. Для минимизации таких потерь оптические элементы просветляют.

Оптическая система стандартного эндоскопа содержит объектив, промежуточную оптическую систему и окулярные секции.

Промежуточные линзы, концентрируя излучение, попадающее в объектив, обеспечивают прохождение пучка света через телескопическую трубку с минимальными потерями. От качества промежуточной оптической системы зависит четкость изображения.

Увеличение  $\Gamma$  оптических систем эндоскопов можно записать в виде произведения

$$\Gamma = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3,$$

где  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  – соответственно увеличение объектива, промежуточных линз и окуляра.

Здесь следует отметить, что линейное увеличение конкретной оптической системы эндоскопа примерно обратно пропорционально глубине наблюдения. Так, например, эндоскоп с увеличением 2 при расстоянии ОК – объектив 80 мм будет иметь увеличение 4 при глубине наблюдения 40 мм.

Эндоскоп с *прямонаправленным обзором* (рис. 44) – тип I – обеспечивает прямое (торцовое) наблюдение на угол визирования. Применяется для контроля торца или дна канала, или штуцера. Эндоскопы с таким типом обзора имеют типичное угловое поле зрения около  $45^0$ . Линейное поле зрения 20 мм на расстоянии 25 мм от линзы до поверхности ОК.

Эндоскоп с *косопрещельным обзором* – тип II – обеспечивает наклонное вперед наблюдение на углы визирования  $25$  и  $45^0$ . Он применяется для контроля, например, сварных швов в торце. В таких эндоскопах источники света обычно монтируются на конце эндоскопа.

Эндоскоп с боковым обзором – тип III, – обеспечивает контроль с углом визирования  $90^{\circ}$ , используется для стенок ОК с достаточно большим увеличением. Это эффективный прибор для визуального контроля стволов ружей, пистолетов, цилиндрических стенок или углубленных отверстий. Эндоскопы этого типа обычно снабжаются источником света, размещенным перед линзой объектива.

Эндоскоп с ретроспективным обзором – тип IV, – обеспечивает наклонные наблюдения назад на угол  $135^{\circ}$ . Используется для контроля задних торцевых стенок, отверстий с внутренними уступами и т.п.

Эндоскоп с панорамным обзором – тип V, – обеспечивает высокопроизводительный осмотр цилиндрической полости сразу по всей кольцевой поверхности ОК.

На основе миниатюрных телекамер, диаметры которых несколько мм, создают роботизированные комплексы дистанционного визуального контроля (КДВК), широко использующиеся в тех ситуациях, когда вредное излучение, температура или химическая среда представляют опасность для здоровья оператора. В состав КДВК обычно входят: промышленная телевизионная установка, световой прибор, системы дистанционного позиционирования и транспортировки. Важными характеристиками этой группы приборов являются: разрешающая способность, световая характеристика и инерционность.

Под разрешающей способностью телевизионной системы понимают количественную оценку передавать и воспринимать на приемной стороне с предельной или заданной различаемостью изображение мелких деталей изображения. Обычно разрешающая способность оценивается максимальным числом  $v$  чередующихся чер-

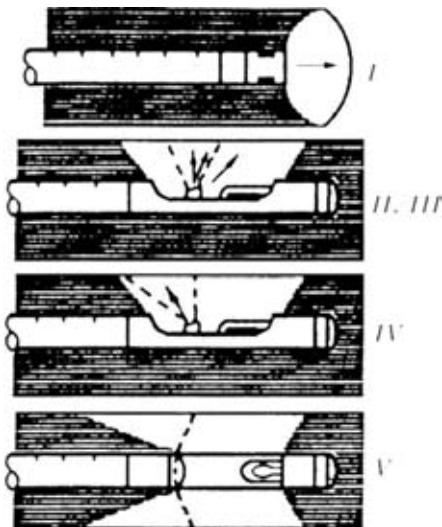


Рис. 44. Различные направления сканирования: I – прямонаправленное; II и III – косоприцельное и боковое; IV – ретроспективное; V – панорамное

ных и белых линий равной ширины, укладывающихся на отрезке, равном ширине кадра, и наблюдаемых на экране. Объект с линейным размером  $l_0$  может быть обнаружен, если его изображение на фотокатоде окажется соизмеримым с одним элементом разложения – шириной одной строки  $\Delta_{\text{фк}}$ , что заметить сложно, поэтому объект в телевизионном изображении может быть уверенно обнаружен в том случае, если его изображение перекрывает три-четыре строки приемного преобразователя.

Так, если размер проекции изображения на фотокатоде  $15 \times 20$  мм, разрешающая способность – 1200 линий, а оптика уменьшает изображение ОК в 10 раз, то размер разрешаемого элемента поверхности ОК составляет приблизительно 0,4 мм.

Эндоскопические и телевизионные системы визуального контроля снабжаются цифровыми аппаратами (схема показана ниже), которые имеют более широкие возможности чем аналоговые, пленочные фотокамеры. Обе камеры имеют системы линз, диафрагму и затвор, но методы записи и сохранения информации принципиально разные.



Сердце цифровой камеры – прибор с зарядной связью ПЗС матрица – спрятана позади диафрагмы и состоит из светочувствительных полупроводниковых элементов, выполненных из множества кремниевых диодов. Когда свет достигает ПЗС-матрицы, он заряжает каждый элемент – пиксель индивидуально. Эта зарядка в дальнейшем соответствует электрическому импульсу и таким образом мы получаем в цифровой форме данные об освещенности каждого из пикселей. Поскольку невозможно записать полностью информацию обо всем изображении, то в дальнейшем оно подвергается обработке программным обеспечением для восстановления потерянных данных и записывается на магнитные носители.

Таким образом, цифровая фотография является комбинацией работы *ПЗС-матрицы, программного обеспечения и карт памяти*, заменяющих пленку в аналоговом фотоаппарате.

ПЗС-матрица не больше ногтя на пальце и содержит несколько миллионов светочувствительных диодов (например, в модели С-2500 1,700Х 1,300 диодов), расположенных на поверхности матрицы в виде столбцов и колонок.

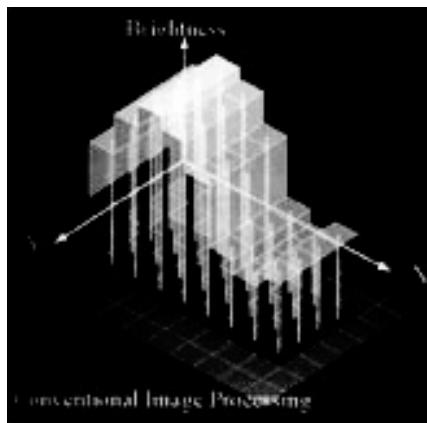
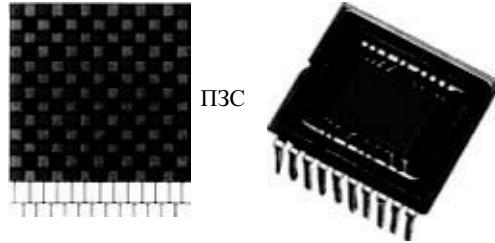
Если использовать в объективе различные цветовые фильтры: красный, зеленый, синий или их комбинацию, то картинка наиболее реалистична. Сила освещенности поделена на 256 уровней, благодаря этому цвет может быть охарактеризован числовым значением и информация о нем может быть сохранена.

Разрешение определяется числом светочувствительных диодов на поверхности ПЗС-матрицы. Например, если в инструкции к фотоаппарату говорится, что он обладает разрешением  $1600 \times 1200$  пикселей, это означает, что ПЗС-матрица имеет порядка 2 млн диодов на своей поверхности.

Хотя утверждение, чем больше пикселей, тем большее разрешение, тем лучше изображение в основном верно, тем не менее, другие факторы оказывают значительное влияние на качество «картинки». Так, очень важным является качество производства самой ПЗС-матрицы. Чем качественнее сделана матрица, тем меньше на ней будет неработающих диодов (размер одного диода порядка 7,5 микрон).

Кроме разрешения и качества ПЗС-матрицы, важным фактором для качественной работы является оптическая система цифрового фотоаппарата. Это включает в себя наличие высококачественного и высокоразрешающего объектива, эффективность вспышки и возможность ручной установки параметров экспозиции. Необходимо также обратить внимание на систему записи изображения этого фотоаппарата.

Если выбирать между фотоаппаратами с одинаковым разрешением, то лучше выбрать фотоаппарат с небольшой ПЗС-матрицей.



Обычно небольшой размер говорит о том, что эта матрица новее. Поясним почему. Размер ПЗС-матрицы – примерно 1/2 дюйма, т.е. приблизительно 1,5 см по диагонали, в то время как размер кадра обычной пленки составляет около 4,3 см. При этом обычный фотоаппарат обеспечивается от 30 до 60 пар черно-белых линий на миллиметр, в то время как цифровой фотоаппарат производит до 150 пар линий на миллиметр. Все это приводит к тому, что цифровой фотоаппарат очень сильно чувствителен к условиям освещенности и количеству света, прошедшего через оптическую систему.

Цифровые камеры оснащены электронным эквивалентом затвора, который встроен в матрицу и выполняет работу, аналогичную механическому затвору. В более дорогих камерах вмонтированы два затвора и механический затвор служит для предотвращения попадания на сенсор света после окончания времени выдержки, что позволяет избежать появления артефактов ореола, частично блюминга и смазывания.

В некоторых цифровых фотоаппаратах при нажатии клавиши затвора наполовину происходит срабатывание систем автоматики. Автофокус и система определения экспозиции фиксируют параметры съемки и ждут полного нажатия. При полном нажатии клавиши спусковой кнопки механический затвор (при наличии) закрывается, происходит сброс заряда в ячейки матрицы. Механический затвор открывается на время экспонирования.

Видоискатель – элемент фотоаппарата, показывающий границы будущего снимка и в некоторых случаях резкость и параметры съемки.

Процессоры в цифровых фотоаппаратах выполняют следующие функции:

- управления работой затвора;
- управления объективом в автоматическом и ручном режимах съемки;
- выбора баланса белого, измерение освещенности объекта, определение экспопары;
- управления вспышкой и др.

Карта памяти (флэш карта) – носитель информации, который обеспечивает длительное хранение данных большого объема, получаемых цифровым фотоаппаратом.

## **XIII. ОСНОВЫ УГЛОВЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

### **1. Виды погрешности, основные понятия**

Метрология в современном понимании – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

*Измерением* называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью технических средств.

Численное значение  $x$  величины  $X$  представляет собой отношение измеряемой величины к величине  $N$ , принимаемой за единицу измерения:

$$X = xN.$$

Основными единицами Международной системы единиц (СИ) являются:

- метр (м) – единица длины;
- килограмм (кг) – единица массы;
- секунда (с) – единица времени;
- ампер (А) – единица силы тока;
- кельвин (К) – единица термодинамической температуры;
- кандела (кд) – единица силы света;
- моль (моль) – единица количества вещества.

Метр – длина пути, проходимого в вакууме светом за 1/299792458 с.

Рекомендуемые краткие и дольные единицы, образованные от метра, – км, см, мм, мкм, нм.

Распространенной единице измерения угла является градус, который равен  $1/360$  окружности. Градус обозначается « $^{\circ}$ » и делится на 60 минут, а минута – на 60 секунд. Минута и секунда обозначаются соответственно «'» и «''».

Системой СИ в качестве дополнительной единицы измерения углов предусмотрен радиан. Под радианом понимается угол между

двумя радиусами круга, длина дуги между которыми равна радиусу. Один радиан равен  $57^0 17' 44,8''$ .

Измерения по способу получения результатов разделяют на прямые, косвенные, абсолютные и относительные (табл. 26).

**Таблица 26. Виды измерений**

Название	Определение
Прямое	Искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных
Косвенное	Значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, полученными прямыми измерениями
Абсолютное	Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и использовании физических констант
Относительное	Отношение к одноименной величине, играющей роль единицы

Метрологическими показателями являются: цена деления шкалы, диапазон измерений, предел допустимой погрешности средств измерений, допустимая погрешность измерительного средства, пределы измерения.

Основные виды погрешности и основные понятия, их касающиеся, систематизированы в табл. 27.

**Таблица 27. Погрешности измерений и их составляющие**

Погрешность	Определение	Причины возникновения погрешности
1	2	3
<i>Составляющие погрешности измерения</i>		
Систематическая	Остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины	Отклонение от нормальной температуры измерения; измерение прибором, у которого указатель смещен относительно нулевой отметки
Случайная	Изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины	Округление при считывании показаний прибора; вариации показаний прибора

Продолжение табл. 27

1	2	3
<i>Составляющие систематической погрешности измерения</i>		
Инструментальная	Зависящая от погрешностей применяемых средств измерения	Несовершенство кинематической схемы прибора; отклонения размеров, формы и расположения поверхностей деталей прибора; износ прибора при эксплуатации
Методическая	Происходящая от несовершенства метода измерений	Невыполнение нормальных условий измерения; неправильная установка прибора; применение приближенных расчетных формул; ошибочные методики измерения
Субъективная	Обусловленная индивидуальными особенностями наблюдателя, производящего измерения	Недостаточно точное считывание показаний прибора; ошибки при оценке на глаз долей деления шкалы, соответствующих положению указателя; параллакс при отсчете показаний прибора; разная реакция органов чувств на сигналы

*Погрешностью измерения* называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Абсолютная погрешность измерения  $\Delta x$  определяется формулой

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x,$$

где  $x_{\text{изм}}$  – значение, полученное при измерении;  $x$  – истинное значение величины.

Погрешности обычно подразделяют на несколько групп (см. табл. 27) по своему происхождению..

Измерения осуществляют с помощью технических средств, к которым относят меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки и измерительные системы. Их параметры даны в табл. 28.

Важнейшими являются нормальные условия применения средств контроля. Условия применения средств измерений, при которых основные величины имеют нормальные значения или нахо-

дятся в пределах нормальной области значений. При нормальных условиях определяется основная погрешность средств измерения, которая является номинальной.

**Таблица 28. Параметры и понятия процесса измерений**

Параметр	Определение
Номинальное значение	Значение величины, указанное на мере или приписанное ей
Действительное значение меры	Действительное значение величины, воспроизведенной мерой
Отсчет	Число, считанное по счетному устройству средства измерения, либо полученное счетом последовательных отметок или сигналов
Показания прибора	Значение, определяемое по счетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины
Диапазон измерений	Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности
Предел измерений	Наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений
Чувствительность измерительного прибора	Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Абсолютная чувствительность $\Delta I / \Delta x$ . Относительная чувствительность $\Delta I / (\frac{\Delta x}{x}),$ где $\Delta I$ – изменение сигнала на выходе; $x$ – измеряемая величина; $\Delta x$ – изменение измеряемой величины

В табл. 29 систематизированы определения основных видов погрешностей.

**Таблица 29. Погрешности средств измерений**

Погрешность	Определение
1	2
$\Delta x$ абсолютной меры	Разность между номинальным значением меры $x_n$ и истинным значением $x$ воспроизводимой ею величины
$\Delta x_n$ абсолютная измерительного прибора	Разность между показанием измерительного прибора $x_n$ и истинным значением $x$ измеряемой величины $\Delta x_n = x_n - x.$

Продолжение табл. 29

1	2
δ относительная мера	Отношение абсолютной погрешности меры к истинному значению величины, воспроизводимой мерой $\delta = \pm \frac{\Delta x}{x_n} 100$
Δ <sub>пр</sub> приведенная измерительного прибора	Отношение погрешности измерительного прибора к нормирующему значению $x_N$ . За нормирующее значение $x_N$ условно принимают значение верхнего предела измерений, длины шкалы и др. $\Delta_{\text{пр}} = \frac{\Delta x}{x_N} 100$
Основная средства измерений	Погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях
Дополнительная	Погрешность, вызванная отклонением от нормальных условий измерений
Предельно допустимая	Наибольшая погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению

При измерениях используется большое число специфических понятий. Проведем определения некоторых из них.

*Эталон единицы* – средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы, официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

*Проверочная схема* – документ, устанавливающий порядок передачи размера единицы от эталона рабочим средствам измерений.

*Образцовое средство измерений* – это мера, служащая для поверки по ним других средств измерений.

*Рабочее средство измерений* – средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

*Проверка* – определение метрологическим органом погрешностей средств измерений и установление его пригодности к применению.

*Метрологическая аттестация средств измерений* – исследование средства измерений, выполняемое метрологическим органом.

*Калибровка меры* – поверка меры (набора мер) посредством совокупных измерений.

*Градуировка средств измерений* – определение зависимости между значениями величин на входе и выходе средства измерений, составленная в виде таблицы, графика или формулы.

*Юстировка средств измерений* – совокупность операций по доведению погрешности средств измерения до значений, соответствующих техническим требованиям.

*Отклонение* – алгебраическая разность между размером (действительным, предельным и т.п.) и соответствующим номинальным размером.

*Измерение* (ГОСТ 16263–70) – нахождение значения физической величины опытным путем с помощью технических средств.

*Контроль* (ГОСТ 16504–74) – проверка соответствия продукции или процесса, от которого зависит качество продукции, установленным требованиям.

*При измерении определяют действительный размер, а при контроле – размерную группу детали.*

В простейшем случае контроля детали сортируют на годные и бракованные (исправимый или неисправимый брак).

В качестве примера оценки качества и измерений приведем определение шероховатости на глаз или по образцам шероховатости – это пример балльной оценки (контроля), который не попадает под термин «измерение». Определение величины Ra или Rz – пример измерения – попадает под термин «измерение». Переход от измерения к балльной оценке возможен ( $Ra1,6 = \sqrt{6}$ ), а обратный переход от такой оценки к точечному результату невозможен.

Среди методов измерений различаем метод непосредственной оценки и метод сравнения с мерой.

Метод *непосредственной оценки* производительнее, проще, и, кроме того, отпадает необходимость в установочной мере. При использовании метода *сравнения с мерой* возможно применение приборов с меньшим диапазоном измерений по шкале. Точные оптические приборы для линейных измерений предназначены как для метода сравнения с мерой (оптиметры, контактные интерферометры), так и для метода непосредственной оценки (длиномеры, измерительные микроскопы).

*Единство и точность измерений* (ГОСТ 16263–70) – это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины.

Количественно точности измерений может быть выражена величиной, обратной модулю относительной погрешности. Например, если относительная погрешность измерений  $3 \cdot 10^{-1} \% = 3 \cdot 10^{-3}$ , то точность равна  $10^3/3$ .

Измерительный прибор (ГОСТ 16263-70) – это средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

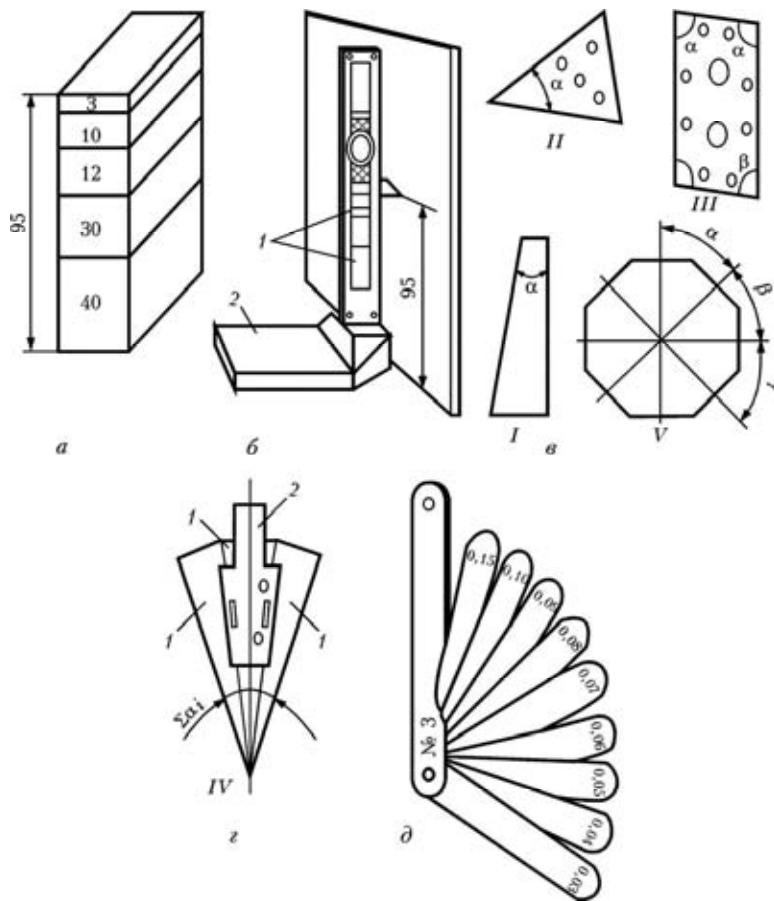


Рис. 45. Плоскопараллельные линейные (а), угловые (б, в, г) и зазорные (д) измерительные меры

Измерительные приборы по принципу действия делят на группы: штангенприборы, микрометрические, оптические, электрические, пневматические и др. измерительные головки и приборы на их основе (нутромеры, скобы, специальные приборы, в том числе многомерные

и др.). Далее дано их описание. По назначению измерительные приборы классифицируют:

- для внутренних и наружных измерений;
- измерения резьбы и наружных измерений;
- углов и конусов; шероховатости;
- зубоизмерительные; кругломеры и др.

Систематизировать все погрешности почти невозможная задача, если учесть разнообразие современных приборов по принципу действия, схеме, конструкции, технологии изготовления. Отношение некоторых составляющих погрешностей к погрешности инструментальной или не инструментальной является спорным вопросом.

*Цена деления* – изменение измеряемой величины, соответствующее перемещению указателя на одно деление шкалы. Для большинства современных приборов линейных измерений цена деления составляет 1; 0,1; 0,05; 0,02; 0,01; 0,005; 0,002; 0,001; 0,0005; 0,0002; 0,0001 мм. Понятие «цена деления» распространяется на все приборы линейных измерений.

*Длина деления шкалы* – расстояние (мм) между двумя ближайшими отметками шкалы. Для многих приборов линейных измерений длина деления шкалы составляет 1 мм или близка к 1 мм. При такой длине деления возможно наиболее точно на глаз отсчитать десятые доли деления шкалы при наименьшем утомлении контролера. Длина деления в этом смысле является оптимальной. Однако в оптических приборах с окулярным отсчетом длина деления шкалы обычно в несколько раз меньше 1 мм, например, для оптиметровой трубки она составляет 0,08 мм. Так как эта шкала рассматривается через окуляр с 12 кратным увеличением, то видят шкалу с длиной деления  $0,02 \cdot 12 = 0,96 \approx 1$  мм.

*Чувствительность прибора* – это отношение длины деления шкалы к цене деления. Для большинства приборов линейных измерений она составляет приблизительно 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000. Чувствительность приборов для линейных измерений является безразмерной величиной. Для пружинных измерительных приборов, индикаторов часового типа чувствительность численно равна передаточному отношению механизма прибора.

*Диапазон показаний* (измерений по шкале) – область значений шкалы, ограниченная ее начальным и конечным значениями. Например, для большинства микрометров диапазон измерений по шкале равен 25 мм, для оптиметра  $\pm 0,1$  мм.

*Диапазон измерений* – область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средств измерений. Например, диапазон измерения для микрометров 0...25, 25...50, 50...75 мм и т.д., для проекционного вертикального оптического ИКВ-3 0...200 мм.

*Точность измерений* – это качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины; при этом высокая точность измерений соответствует малым погрешностям всех видов. Как систематических, так и случайных.

*Класс точности средств измерений* – обобщенная характеристика, обусловленная пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей и другими влияющими на их точность свойствами средств измерения. Класс точности присваивается средствам измерения по правилам, регламентируемым ГОСТ 8.401–80.

Условные обозначения класса точности наносятся на циферблаты, щитки и корпуса средств измерений.

Класс точности средства измерения устанавливают его калибровкой по образцовому средству в нормальных условиях, причем показания образцового средства необходимо принимать за истинное значение измеряемой величины.

Если средства измерений характеризуются допускаемой приведенной погрешностью, им присваивается класс точности из ряда: [1; 1,5; (1,6); 2; 2,5; (3); 4; 5; 6] · 10<sup>n</sup>, где  $n = 1; 0; -1; -2$  и т.д. При одном и том же показателе степени  $n$  для конкретного средства измерений можно устанавливать не более пяти различных пределов. В документах и на средствах измерений устанавливаются одинаковые обозначения, например, при приведенной основной погрешности  $\gamma = \pm 1,5\%$  класс точности 1,5.

Если точность средства измерений характеризуется основной относительной погрешностью ( $\delta$ ), то, например, для  $\delta \pm 2\%$  устанавливаются следующие обозначения: в документации – класс точности 2,0; на средствах измерения – 2,0.

Для средств измерений с логарифмической, гиперболической и другими неравномерными шкалами допускается наносить знаки в виде точек или треугольников, указывающих часть шкалы, в пределах которой действует этот знак. Этот же знак является обозначением класса точности.

## 2. Средства измерительного контроля

Концевые плоскопараллельные меры длины (ГОСТ 9038–90) – применяются для хранения и передачи единицы длины, для проверки и градуировки, различных мер и приборов, для проверки калибров, а так же для измерения размеров изделий и приспособлений, для точных разметочных и координатно-расточных работ, для наладки станков и т.п. (рис. 46).

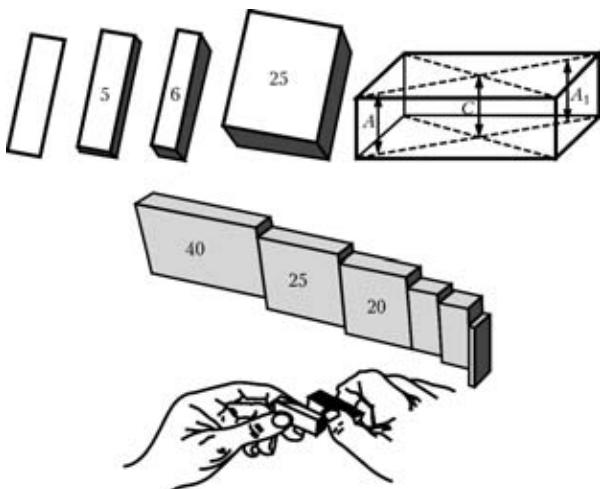


Рис. 46. Концевые измерительные меры

Концевые плоскопараллельные меры длины представляют собой прямоугольные параллелепипеды из закаленной хромистой стали (120ХГ, ХГ, ШХ15) или твердого сплава (ВК6М), размер которых определяется расстоянием между двумя строго параллельными плоскостями при температуре 20 °С.

Разность между срединной длиной [2] концевой меры  $C$  и длиной перпендикуляра, опущенного из любой точки поверхности меры на противоположную измерительную поверхность (например,  $A$  или  $A_1$ ), характеризует отклонение от плоскопараллельности данной меры. Требования по плоскопараллельности концевых мер длины оговорены в ГОСТ 9038–90 для 0...5 классов точности.

Концевые меры длины выпускаются в 14 различных наборах от 7 до 116 плиток в наборе. Наиболее широкое применение имеет набор № 1, состоящий из 87 плиток. В этот набор входят защитные

плитки, применяющиеся с целью сохранения рабочих поверхностей концевых мер. В отличие от обычных мер, защитные меры имеют с одного края закругленные ребра или срез.

Для более широкого использования концевых мер к ним выпускаются наборы принадлежностей (по ГОСТ 4119–76), состоящие из различных боковиков: плоскопараллельные, радиусные, центровые и чертильные, державки и стяжки для крепления блоков концевых мер с боковиками (ПК-1, ПК-2, ПК-3). Кроме того, выпускаются дополнительные плоскопараллельные меры длины размером от 320 до 1500 мм. Из плиток и радиусных боковиков можно собрать проходные и непроходные однопредельные скобы и пробки (для деталей 2-го и ниже классов точности).

Способность концевых мер плотно слипаться при надвигании одной плитки на другую называется притираемостью.

При составлении блока отдельные плитки промывают бензином и тщательно вытирают. Затем плитку накладывают на вторую примерно на 1/3 ее длины и плотно прижимают одна к другой.

Аттестацию и контроль концевых мер выполняют по ГОСТ 8.166–75 интерференционным методом с помощью стеклянных пластин.

Шероховатость рабочих поверхностей концевых мер по ГОСТ 2789-73 составляет  $Rz = 0,065 \dots 0,050$  мкм.

*Линейки измерительные металлические* (ГОСТ 427–75) с пределами измерений до 3000 мм с ценой деления 1 мм (рис. 47) не должны иметь отклонения от номинальных значений длины шкалы и расстояний между любым штрихом и началом на величины, более представленных ниже:

общая длина, мм	допустимое отклонение, мм
до 300	$\pm 0,10$
от 300 до 500	$\pm 0,15$
от 500 до 3000	$\pm 0,20$

*Рулетки измерительные металлические* (ГОСТ 7502–89) предназначаются для измерения линейных размеров непосредственным сравнением со шкалой рулетки (рис. 47).

Они изготавливаются из:

- нержавеющей стали (в условном обозначении рулетки – Н);
- углеродистой стали с защитным антикоррозионным покрытием (в обозначении – У);
- с кольцом (в обозначении – К);

- с держателем для закрепления на предмете, подлежащем измерению (в обозначении – Д);
- с грузом (в обозначении – Г);
- с прямоугольным торцом (в обозначении – П).

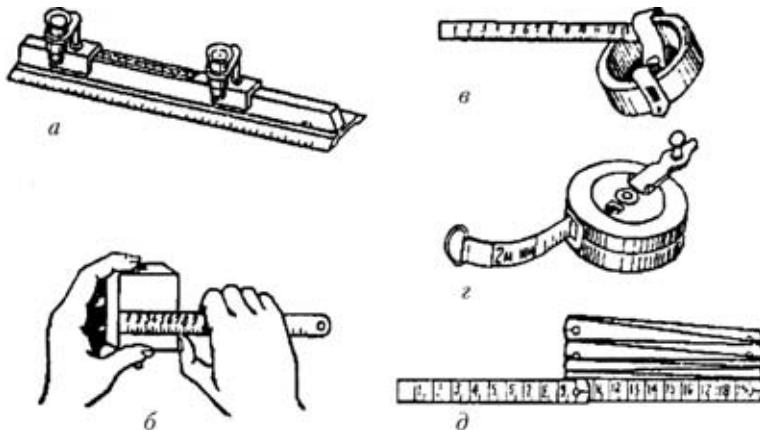


Рис. 47. Штриховые инструменты: линейки (*а, б*), рулетки (*в, г*), метр (*д*)

**Пример.** Условное обозначение рулетки: Р30Н2К ГОСТ-7502 расшифровывается так: рулетка с номинальной длиной шкалы 30 м, лентой из нержавеющей стали 2-го класса точности, с кольцом на вытяжном конце ленты.

### 3. Штангенциркульные и микрометрические измерительные приборы

*Штангенприборы* [2] применяют для непосредственной оценки линейных размеров. Принцип отсчитывания штангенприборов основан на совмещении штрихов двух линейных шкал – основной шкалы и шкалы нониуса (рис. 48).

К основным видам штангенприборов относятся:

- штангенциркули (штангендлиномеры);
- штангентглубиномеры;
- штангенрейсмусы (штангенвысотомеры).

Штангенциркули (ГОСТ 166-89) используют для измерения наружных и внутренних размеров, глубин и уступов. Они являются наиболее распространенным видом штангенприборов.

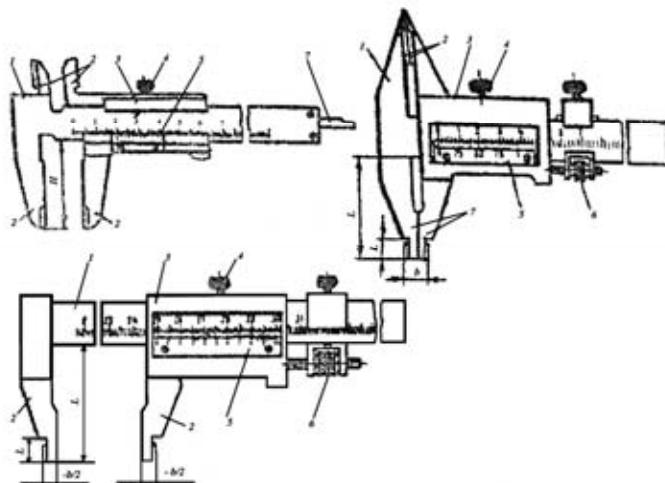


Рис. 48. Штангенциркули:

1 – штанга; 2 – измерительные губки; 3 – рамка; 4 – стопорный винт;  
5 – но尼ус; 6 – гайка микрометрической подачи; 7 – линейка глубинометра

Наиболее распространенными являются штангенциркули следующих типов:

ШЦ-1 – с двусторонним расположением губок для наружных и внутренних измерений и линейкой для измерения глубин. Предел измерений – 0...125 мм; предельная погрешность показаний  $\pm 0,1$  мм; величина отсчета по но尼усу – 0,1 мм.

ШЦТ-1 – аналогичен ШЦ-1, только с измерительными поверхностями из твердого сплава.

ШЦ-II – с двусторонним расположением губок для наружных и внутренних измерений и для разметки. Предел измерений – 0...160, 0...250, 0...320 мм; предельная погрешность показаний  $\pm 0,05$  мм; величина отсчета по но尼усу – 0,05 мм (рис. 49).

ШЦ-III – с односторонним расположением губок для наружных и внутренних измерений. Может быть с дополнительным разметочным устройством. Предел измерений – 0...160, 0...250, 0...400, 250...630, 320...1000, 500...1600, 800...2000, 1500...3000, 2000...4000 мм; пре-

дельная погрешность показаний  $\pm 0,05$ ;  $\pm 0,05$ ;  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ ;  $0,4$  мм; величина отсчета по нониусу –  $0,02$  –  $0,05$  или  $0,1$  мм.

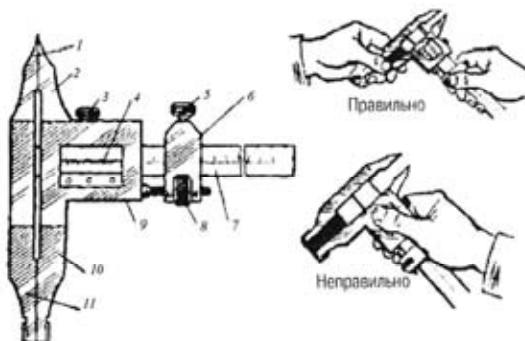


Рис. 49. Использование штангенциркуля ШЦ-II:  
1, 2, 10, 11 – губки; 3, 5 – стопорные винты; 4 – нониус;  
6 – движок; 7 – штанга; 8 – гайка; 9 – рамка

Нижний предел измерений штангенциркулей – ноль. Однако необходимо уточнить, что нижний предел внутренних измерений штангенциркулей ШЦ-II и ШЦ-III составляют не ноль, а определяется суммарной толщиной губок и равен (для новых) 10 мм до предела измерений 400 мм и 20 мм для предела измерений выше 400 мм.

Нижний предел измеряемых наружных размеров больших штангенциркулей ШЦ-III не ноль, а 250, 320, 500, 800, 1500, 2000 мм, причем хотя нулевая точка имеется, однако участка шкалы, начинаящегося от нуля, не существует.

Вылет губок для измерения наружных размеров составляет 35...150 мм, для измерения внутренних размеров 6...18 мм.

ШЦК – штангенциркуль, имеющий круговую шкалу, т.е. вместо нониусного отсчетного устройства – индикаторное. Такой штангенциркуль имеет закрепленную на штанге зубчатую рейку, которая входит в зацепление с зубчатым колесом измерительной головки, установленной на подвижной рамке. Предел измерений – 0...200 мм; предельная погрешность показаний  $\pm 0,02$ ;  $0,05$ ;  $0,1$  мм; величина отсчета по шкале –  $0,02$ ;  $0,05$ ;  $0,1$  мм.

При измерении штангенциркулем должна быть предусмотрена возможность перемещения детали между губками с легким трением. При снятии отсчета целое число миллиметров отсчитывают по

штанге по ближайшему штриху слева от нулевого штриха, а доли миллиметра – по нониусу в точке, где штрих нониуса наилучшим образом совпадает со штрихом штанги (рис. 50).

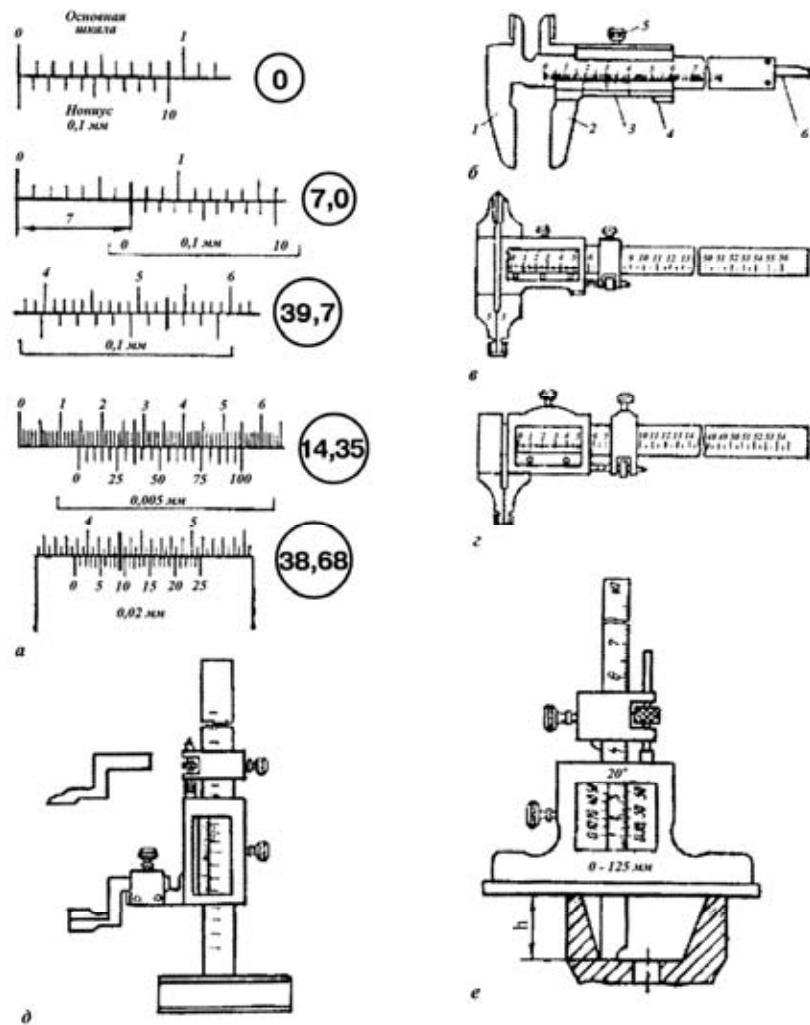


Рис. 50. Отсчеты по штангенинструментам:  
 а – схема отсчетного устройства; б – г – штангенциркули ШЦ-1, ШЦ-II, ШЦ-III; д – штангенрейсмус; е – штангенглубиномер; 1 – штанга; 2 – измерительная губка; 3 – нониус; 4 – рамка; 5 – винт крепления рамки; 6 – ножка

Устройство микрометрической подачи штангенприборов применяют для тонкой установки рамки относительно штанги. При этом в случае наружных измерений сначала прибор устанавливается на размер несколько больший измеряемого, затем закрепляют рамку устройства микрометрической подачи, а далее при помощи этого устройства доводят губки до соприкосновения с измеряемой деталью и производят отсчет.

Штангенциркули со значением отсчета по нониусу 0,1 мм и верхним пределом до 400 мм, а также с отсчетом по круговой шкале с ценой деления 0,1 мм изготавливаются двух классов точности – 1 и 2.

Предел допускаемой погрешности при значении отсчета по нониусу:

0,05 мм – должен соответствовать  $\pm 0,05$  мм

0,1 мм – для класса точности 1  $\pm 0,05$  мм

0,2 мм – для класса точности 2  $\pm 0,1$  мм.

Условное обозначение – ШЦ-II-250-0,05 согласно ГОСТ 166–89 расшифровывается так: штангенциркуль типа II с диапазоном измерения 0...250 мм и значением отсчета по нониусу 0,05 мм.

*Штангенглубиномеры* (ГОСТ 162-90) служат для измерения глубин. Прибор состоит из основания и штанги. Одна из поверхностей основания является измерительной. Торец штанги, который перемещается перпендикулярно относительно измерительной поверхности основания, является другой измерительной поверхностью. Торец штанги может быть изготовлен с обратной губкой. Предел измерений штангенглубинометров – 160, 250, 400 мм; цена деления по нониусу – 0,05 мм; предельная погрешность показаний  $\pm 0,1$ ; 0,15. При измерении прибор основанием устанавливается на базовую поверхность детали, а штангу выдвигают до соприкосновения с ее дном.

*Штангенрейсмусы* (ГОСТ 164-90) применяют для измерения высоты деталей и разметки. От штангенциркуля этот прибор отличается тем, что вместо неподвижной губки он имеет массивное основание, а на рамке можно устанавливать сменные ножки для измерения высоты (с двумя измерительными поверхностями) или ножки (с острием) для разметки (рис. 48 – 51). Штангенрейсмус в отличие от других штангенприборов является настольным прибором.

Предел измерений – 0...125; 0...250; 40...400; 60...630; 100...1000; 600...1600; 1500...2500 мм; величина отсчета по нониусу

$c_u = 0,05; 0,1$  мм; погрешность показаний  $\pm 0,05; 0,1$  мм; вылет ножки – 50...160 мм.

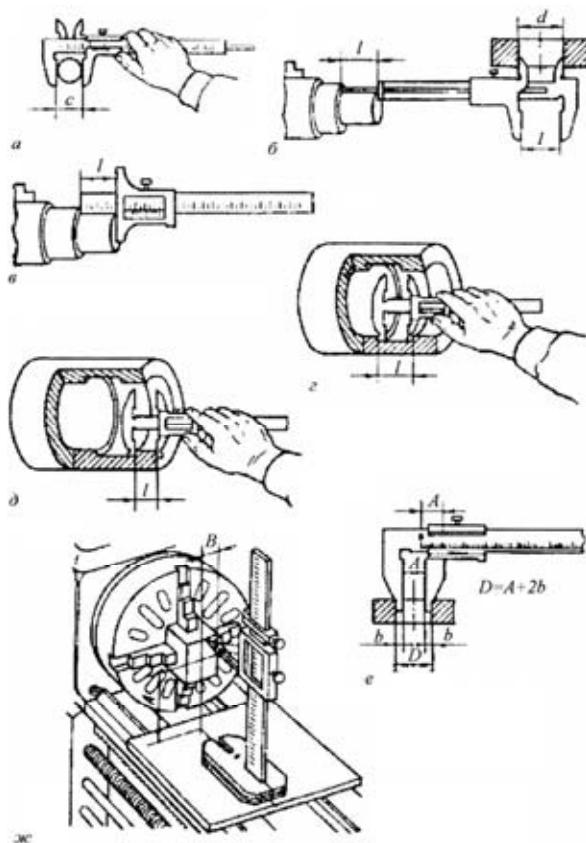


Рис. 51. Измерения с помощью штангенинструментов:  
 а – диаметров; б, в – длии; г, д – внутренних канавок; е – диаметров отверстий; ж – вывертка и разметка

*Микрометрические приборы* (рис. 52) применяют при измерении малых линейных размеров, как правило, методом непосредственной оценки.

Принцип отсчитывания основан на взаимодействии двух шкал – основной шкалы на стебле и шкалы на конической поверхности барабана. Микрометрические приборы имеют винтовую пару, преобразующую вращательное движение микрометрического винта в поступательное.

К приборам этой группы относятся:

- микрометры;
- микрометрические глубиномеры;
- микрометрические нутромеры.

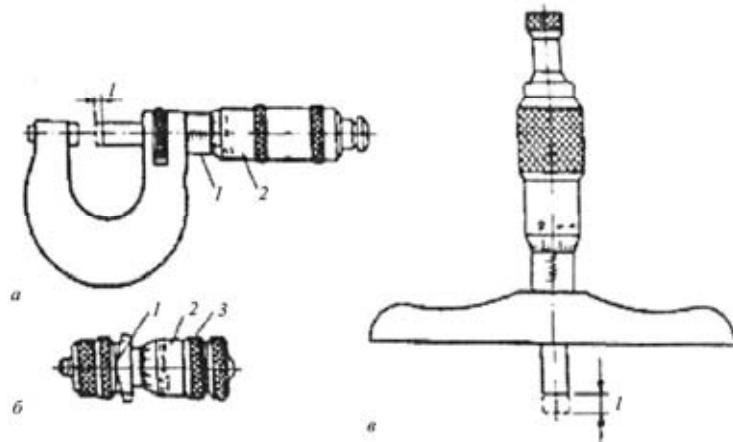


Рис. 52. Микрометрические инструменты:  
а – микрометр (1 – стебель, 2 – барабан); б – нутромер (1 – стебель,  
2 – микрометрический винт); в – глубиномер

Такой же принцип действияложен в основу работы микрометрических головок инструментальных микроскопов, проекторов.

Микрометрические приборы обеспечивают более высокую точность измерений, чем штангенприборы, при меньшей производительности. Последнее очевидно, если сравнить скорость перемещения рамки по штанге (скольжение) со скоростью перемещения микрометрического винта, шаг которого обычно равен 0,5 мм.

*Микрометры* предназначены для наружных измерений (ГОСТ 6507-90) (рис. 53).

Различают микрометры следующих типов:

МК – гладкий микрометр, для измерения наружных размеров, имеет плоские измерительные поверхности и является наиболее универсальным и распространенным микрометром.

Предел измерений: 0...15; 0...25; 25...50; 50...75; 75...100; 125...150; 150...175; 175...200 и т.д. 300...400; 400...500; 500...600 мм. Интервал 100 мм образуется вследствие перемещения переставной упругой пятки (до 75 мм). Имеются и большие микрометры.

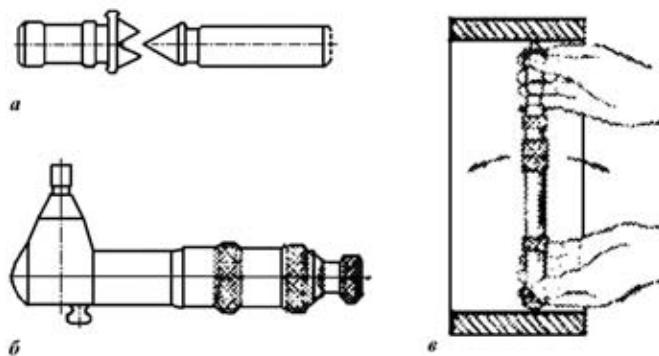


Рис. 53. Микрометрические инструменты специализированные:  
а—вставки к микрометру для контроля резьбы; б—микрометр для измерения внутренних размеров; в—схема контроля отверстия нутромером

Микрометры изготавливают 0-го, 1-го и 2-го класса точности. Нулевой класс точности имеют только гладкие микрометры. Предел допускаемой погрешности для первого класса от  $\pm 0,002\ldots 0,006$  мм в зависимости от размера. В микрометрах второго класса точности предел погрешности составляет от  $\pm 0,004\ldots 0,010$  мм в зависимости от типоразмера.

Расшифровка обозначения МК 25-1 ГОСТ 6507-90: микрометр с пределом измерений 0...25; 1 класс точности.

Для измерения толщины листов и лент предназначен листовой микрометр МЛ-10-1 (рис. 54).

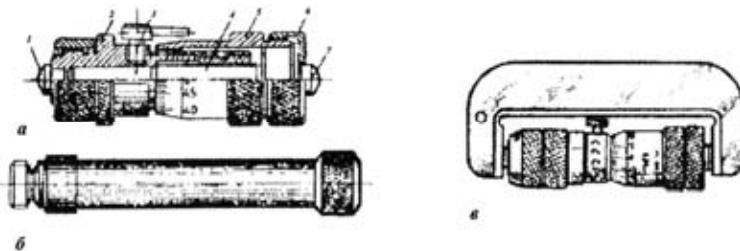


Рис. 54. Микрометрический нутромер:  
а—устройство; б—удлинительный стержень; в—проверка нулевого положения; 1, 7—измерительные поверхности; 2, 6—гайки;  
3—стопор; 4—микрометрический винт; 5—барабан

В листовых микрометрах, в отличие от гладких, сотовые доли миллиметра отсчитывают с неподвижного циферблата, расположенного перпендикулярно оси микрометрического винта. Стрелка (указатель циферблата) вращается вместе с барабаном. Такое отсчетное устройство обеспечивает более удобное отсчитывание при измерении лежащего листа или ленты. Важная техническая характеристика таких микрометров – возможность проводить измерения на определенном удалении от края листа, определяемом вылетом скобы. Так, для диапазонов измерений: 0...5; 0...10; 0...25 мм вылет составляет 20, 40 и 80 мм. Измерительная поверхность микрометрического винта выполнена плоской, а пятки сферической. Шаг микрометрического винта составляет 1 мм, что уменьшает время измерения. Погрешность показаний  $\pm 0,004$  мм. Предел измерений 0...10 мм; 1 класс точности.

МТ-25-1 (рис. 55,б) – микрометр трубный для измерения толщины стенок труб. Пятка этого микрометра выполнена сферической, а скоба имеет выемку со стороны пятки для ввода ее в трубу. При помощи этой скобы можно измерять толщину стенок труб с внутренним диаметром более 12 мм.

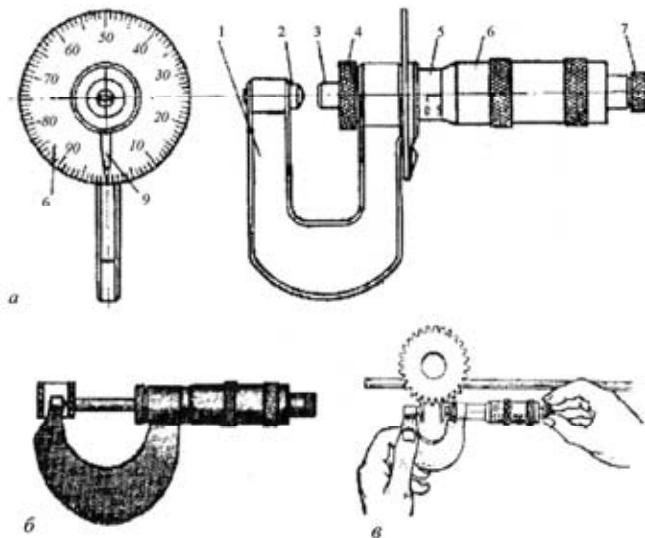


Рис. 55. Микрометры разных типов:  
а – МЛ; б – МТ; в – МЗ; 1 – скоба; 2 – пятка; 3 – винт; 4 – стопор;  
5 – гильза; 6 – барабан; 7 – трещотка; 8 – циферблат; 9 – стрелка

Предел измерений: 0...10; 0...25 мм; погрешность показаний:  $\pm 0,004$  мм; предел измерений: 0...25; 1 класс точности.

Микрометр обычно имеет трещотку (фрикцион) или другое устройство, обеспечивающее измерительное усилие в ньютонах:

- с двумя плоскими поверхностями – 50...90 Н;
- с одной или двумя сферическими поверхностями – 30...70 Н.

Допускаемое колебание измерительного усилия для одного прибора не должно превышать 20 Н.

На погрешность измерения гладкими микрометрами влияют погрешность микрометрической пары, погрешность отсчитывания, отклонения от параллельности измерительных поверхностей, погрешность установочной меры, разгиб скобы под действием измерительного усилия и температурные деформации.

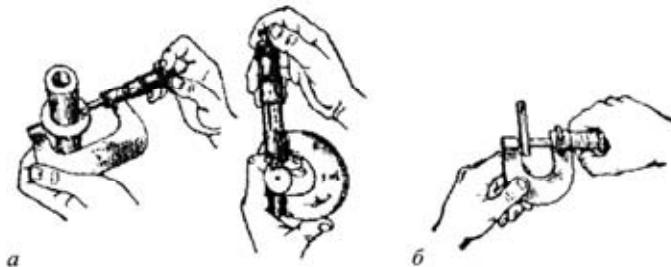


Рис. 56. Неправильное (а) и правильное (б) расположение микрометра относительно детали

Важно правильно (рис. 56) измерять, держать в руках микрометр. При измерении микрометром, пользуясь трещоткой, подводят микрометрический винт до соприкосновения с деталью. Трещотку необходимо поворачивать до тех пор, пока она не станет поворачиваться вхолостую (обычно три раза). Поворачивая деталь, проверяют отсутствие перекоса и снимают отсчет.

Микрометрический глубиномер МГ-100-1 (ГОСТ 7470-78) предназначен для измерения глубин, а также высоты уступов. Глубиномер состоит из основания, имеющего измерительную поверхность, и впрессованного в него стебля, в котором перемещается микрометрический винт. При ввинчивании микрометрического винта глубиномера показания увеличиваются благодаря оцифровке шкал стебля и барабана в обратном направлении по сравнению с микрометром (см. рис. 52, 54).

Предел измерений: 0...100; 0...150 мм; погрешность показаний: 1 класс –  $0\ldots100 \pm 0,003$  мм;  $0\ldots150 \pm 0,004$  мм; 2 класс –  $0\ldots100 \pm 0,005$  мм;  $0\ldots150 \pm 0,006$  мм. Измерительное усилие 30...70 Н обеспечивается трещоткой.

Погрешность измерения глубиномерами вызвана погрешностью глубиномера, погрешностью установочной меры, погрешностью отсчитывания, температурными погрешностями. Основными из перечисленных выше погрешностей являются первая и последняя. Предельная погрешность измерения в зависимости от измеряемых размеров составляет от  $\pm 0,005$  до  $\pm 0,010$  мм.

*Микрометрический нутромер – штихмас НМ-175* – предназначен для измерения внутренних размеров изделий (ГОСТ 10–88) (см. рис. 52, 54).

Нутромер состоит из удлинителей, свинчивающихся друг с другом, к которым по концам привинчиваются жесткий наконечник и микрометрическая головка [2].

Нутромеры бывают:

- с микрометрической головкой;
- с индикаторной головкой;
- телескопические.

Предел измерений: от 50 до 10000 мм; погрешность показаний: от  $\pm 0,004$  до  $\pm 0,180$  мм. В комплект нутромеров с диапазонами измерений от 1250 мм входит индикаторная головка с ценой деления 0,01 мм.

В комплект нутромера входят установочные меры, предназначенные для проверки нулевого положения микрометрической головки и для установки на ноль индикатора.

Для размеров от 1500 до 10000 мм применяют телескопические нутромеры, которые представляют собой трубу, внутрь которой вставлена выдвижная штанга. Грубый отсчет проводится по шкале и нониусу, а точный – по микрометрической головке, расположенной на конце штанги.

Для увеличения точности измерений микрометры дополняют стрелочными отсчетными устройствами; такие приборы называются рычажными микромерами (ГОСТ 4381–87) (рис. 57).

Микрометрический прибор МР (рис. 57) имеет предел измерения: 0...25; 25...50; 50...75; 75...100 мм; цена деления 0,002 мм; предел показаний:  $\pm 0,14$  мм; погрешность показания:  $\pm 0,001$  мм.

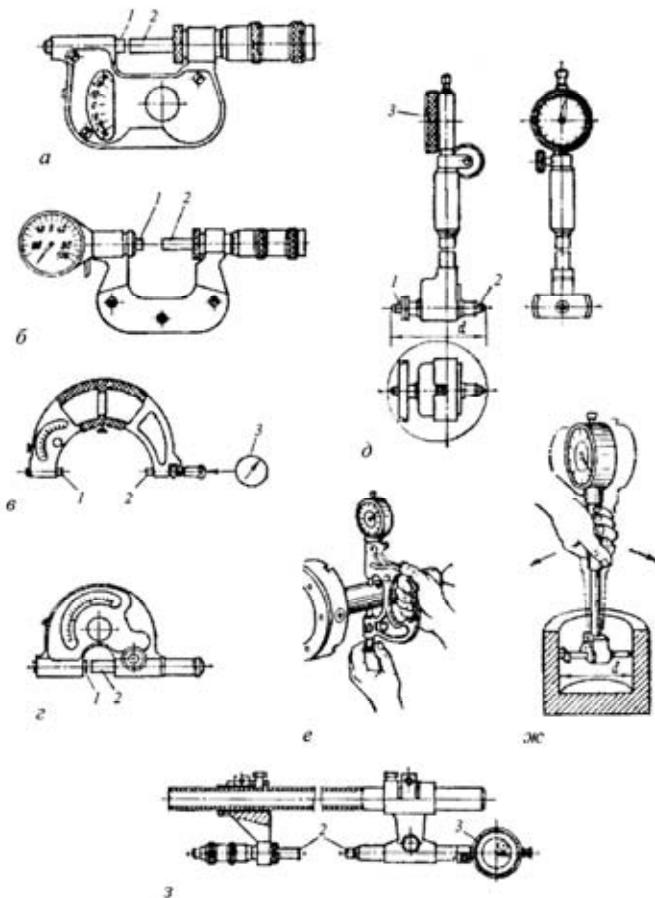


Рис. 57. Измерительные приборы на основе микрометров:  
 а – микрометр рычажный типа МР; б – микрометр рычажный с индикатором; в – индикаторная скоба; г – рычажная скоба; д – индикаторный нутромер; е – схема измерения вала рычажным микрометром; ж – схема измерения диаметра отверстия индикаторным нутромером; з – линейная скоба; 1, 2 – измерительные наконечники; 3 – индикатор

Прибор МРИ предназначен для измерения наружных размеров со съемными измерительными головками. Предел измерения: 100...300; 300...1000 мм.

В модели МРИ 125 предел измерения: 1000...2000 мм; цена деления: 0,002...0,001 мм; предел показаний: 0,1...5 мм; погрешность показания:  $\pm 0,005\ldots 0,007$  мм.

Микромер МН – настольный со стрелочным отсчетным устройством (ГОСТ 10388-63). Предел измерения: 0...10 мм; цена деления: шкалы барабана – 0,01 мм; отсчетного устройства – 0,001 мм.

Рычажный микромер представляет собой рычажную скобу, в которой переставная пятка заменена микрометрической головкой. Постоянное измерительное усилие обеспечивается подпружиненной подвижной пяткой.

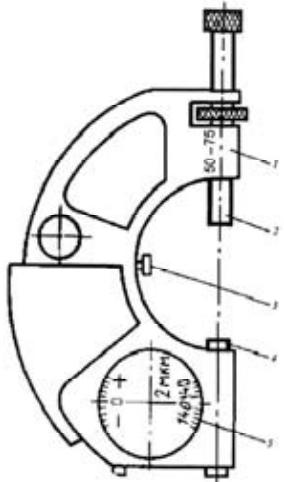


Рис. 58. Рычажная микрометрическая скоба

овальности, конусообразности. В рычажных скобах отсутствует микромер. Винт в этих приборах используется только для расширения пределов измерения при настройке прибора на нуль по установочной мере (рис. 58).

Нутромеры индикаторные [2] применяют для измерения диаметров отверстий, например, нутромер НИ 10-18-1 снабжается отсчетными устройствами с ценой деления 0,01 мм и предназначены для контроля отверстий диаметром от 6 до 1000 мм (рис. 59). По ГОСТ 9244-75 нутромеры с отсчетным устройством с ценой деления 0,001, 0,002 мм – для контроля отверстий от 2 до 50 мм (рис. 59).

Компараторы (ГОСТ 12441-66) служат для проверки штриховых мер длины путем сравнения их с образцовыми штриховыми мерами.

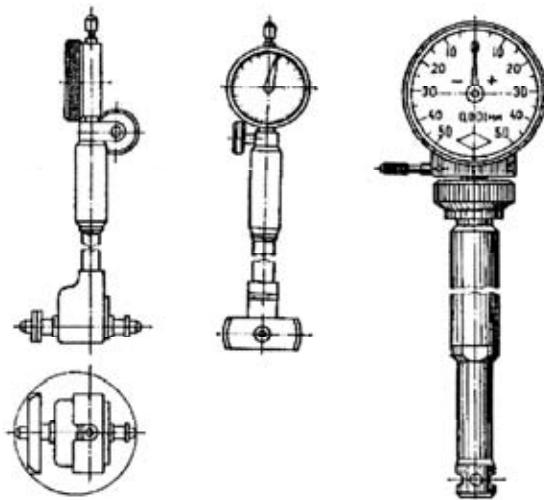


Рис. 59. Индикаторный нутромер

Известны три схемы построения компараторов:

- с параллельным расположением сличаемых мер;
- с поперечным или продольным перемещением визирного и отсчетного микроскопа;
- с последовательным расположением сличаемых штриховых мер и последовательным перемещением визирного и отсчетного микроскопов.

Последняя схема обеспечивает наибольшую точность, так как в ней исключена компараторная погрешность.

*Интерференционные приборы.* Интерференционный метод измерения является одним из наиболее точных, поэтому его применяют в основном для аттестации концевых мер длины высших разрядов, а также для проверки плоскостности небольших поверхностей после доводки или полировки.

Если на хорошо обработанную плоскость детали положить плоскую стеклянную пластину таким образом, чтобы между плоскостью пластины и контролируемой поверхностью образовался небольшой воздушный клин, то на контролируемой поверхности появятся цветные радужные полосы, называемые интерференционными.

Интерференционные полосы располагаются на равных расстояниях. Расстояние между полосами одного и того же цвета при-

нято называть шириной полосы. Интерференционные полосы располагаются только в тех местах, в которых толщина воздушного клина равна вполне определенной величине. Эта величина зависит от источника света, при котором наблюдают интерференционную картину. Если наблюдение интерференционных полос происходит при дневном свете, то полосы располагаются там, где толщина воздушного клина равна 0,3; 0,6; 0,9 мкм и т.д.

Так как интерференционные полосы возникают в местах соответствующих вполне определенным толщинам воздушного клина, то очевидно, крутизна клина будет влиять на частоту полос: чем круче будет клин, тем чаще будут располагаться интерференционные полосы, и наоборот.

В случае идеальной плоской поверхности интерференционные полосы будут прямыми. В противном случае (неплоскости поверхности) полосы будут искривлены: в случае выпуклости проверяемой поверхности интерференционные полосы будут искривлены от ребра клина, а в случае вогнутости – к ребру клина.

Для определения числовой величины искривления проверяемой поверхности следует концы какой-то интерференционной полосы мысленно соединить прямой и сосчитать число полос до этой линии у края поверхности и в средней зоне. Разность полос в этих точках, умноженная на 0,3 мкм, составляет величину искривления контролируемой поверхности.

Контактные интерферометры с переменной ценой деления выпускают на вертикальных (ГОСТ 14028-68) и горизонтальных (ГОСТ 12441-66) стойках (рис. 60).

Свет от источника 1 (рис. 60,в) направляется конденсатором 2 через щель или светофильтр 3 на полупрозрачное зеркало 4. Часть пучка света, пройдя через зеркало, проходит через компенсатор 5 и падает на зеркало 6, отражается от него и опять попадает на полу-прозрачное зеркало 4. Другая часть пучка, отразившись от полу-прозрачного зеркала 4, падает на неподвижное зеркало 8, отразившись от которого снова попадает на разделительную поверхность зеркала 4. Здесь два пучка света, отраженные от неподвижного зеркала 8 и подвижного зеркала 6, которые перемещаются под действием измерительного стержня 7, встречаются с некоторой разностью хода и интерферируют. Объектив 9 проектирует интерференционную картину в плоскость сетки 10, где она рассматривается через окуляр 11, который может отводиться в сторону поворотом вокруг оси 12.

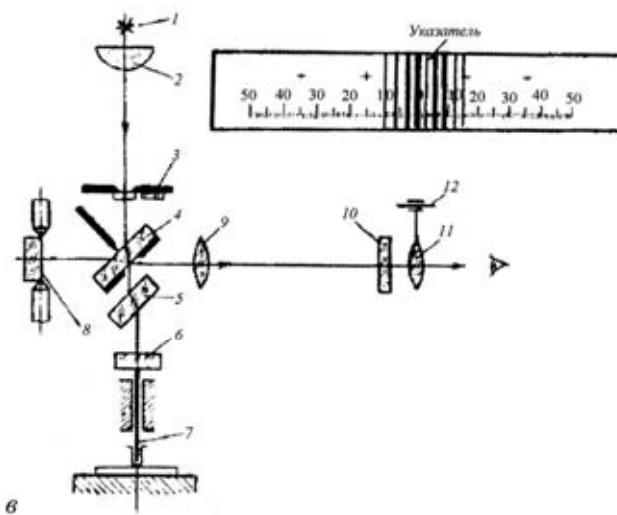
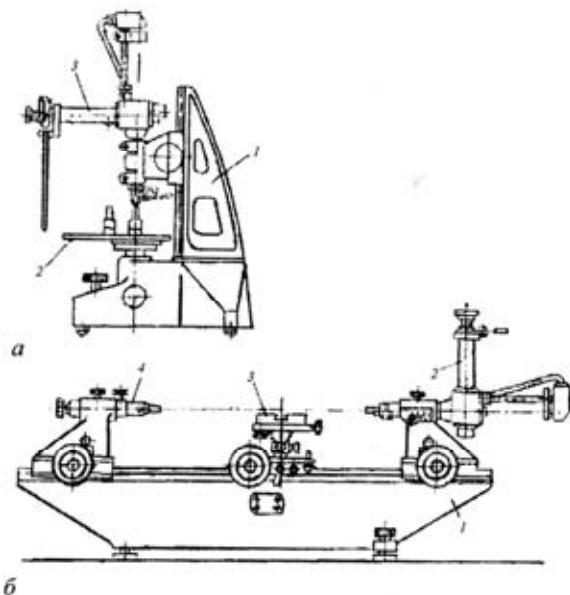


Рис. 60. Интерферометры:

- a* – вертикальный типа ИКПВ: 1 – стойка; 2 – измерительный стол; 3 – трубка интерферометра;
- b* – горизонтальный типа ИКПГ: 1 – станина; 2 – трубка интерферометра; 3 – измерительный стол; 4 – пиноль с опорной измерительной пятой;
- в* – оптическая схема трубы интерферометра

При наблюдении в белом свете (без светофильтра) интерференционная картина представляет собой черную ахроматическую полосу, соответствующую нулевой разности хода интерферирующих пучков, по обе стороны которой расположено несколько цветных полос убывающей интенсивности. Эта центральная черная полоса является указателем для отсчета по шкале прибора. Чтобы оценить величину отсчета в линейной мере, нужно знать цену деления шкалы. Для этого щель перекрывают светофильтром 3, после чего все поле зрения заполняется полосами одинаковой интенсивности. Наклоном зеркала 8 меняют шаг интенсивности полос. Цена деления шкалы  $i = \lambda k / 2n$ , где  $\lambda$  – длина волны (мкм);  $k$  – число полос, поместившихся на участке шкалы в  $n$  делений.

Вертикальный интерферометр ИКПВ-264 (рис. 60,*a*): цена деления: 0,05...0,2 мкм; пределы показаний:  $\pm 50$  делений; пределы измерений: 0...150 мм; предельная погрешность показания:  $\pm (0,03 + 1,5ni\Delta\lambda / \lambda)$ , где  $n$  – число делений от нулевого штриха;  $i$  – цена деления шкалы;  $\lambda$  – длина волны (мкм), пропускаемая светофильтром;  $\Delta\lambda$  – погрешность измерения длины волны (мкм).

Горизонтальный интерферометр ИКПГ-273 (рис. 60,*b*): цена деления: 0,05...0,2 мкм; пределы показаний:  $\pm 50$  делений; пределы измерений: 0...500 мм; предельная погрешность показания:  $\pm (0,03 + 1,5ni\Delta\lambda / \lambda)$ .

*Абсолютный метод измерения.* Длину измеряемой меры определяют непосредственно по числу полуволн однородного (монохроматического) света.

Калибры – бесшкальные контрольные инструменты, предназначенные для поверки размеров, формы и взаимного расположения деталей.

Калибры определяют не числовое значение измеряемых величин, а годность детали, т.е. правильность ее действительных размеров, ограниченных предельными отклонениями.

Классификация калибров.

1. По виду контролируемых изделий и параметров калибры различают: гладкие – для цилиндрических изделий, резьбовые, шлицевые – для контроля длины, уступов, глубины и высоты, для взаимного расположения поверхностей изделий и др.

2. По числу единовременно контролируемых элементов калибры делятся на элементные и комплексные. Элементные – для кон-

троля отдельных размеров. *Комплексные* – для одновременного контроля нескольких элементов.

3. По условиям оценки годности деталей калибры делятся на нормальные и предельные.

*Нормальные калибры* – это калибры, у которых измерительный размер равен заданному номинальному размеру детали. При контроле нормальными калибрами годность проверяемых элементов оценивают на основании субъективных ощущений контролирующего (так как нормальный калибр должен быть проходящим без усилия, но и без зазора), или по краске (при проверке детали шаблонами).

*Предельные калибры* – это калибры, ограниченные предельными размерами контролируемой детали. Предельные калибры изготавливают попарно. Один из них называют проходным, а другой непроходным. Проверяемое изделие считается годным, если проходной калибр проходит, а непроходной калибр не проходит в проверяемое изделие.

4. По технологическому назначению в соответствии с местом и характером использования калибры подразделяются на рабочие и контрольные.

*Рабочие калибры* используют для контроля деталей на рабочих местах в процессе их изготовления.

*Контрольные калибры* используют для контроля или регулировки рабочих калибров.

*Основной принцип конструирования калибров.* При конструировании калибров соблюдают принцип подобия (принцип Тейлора), согласно которому проходные калибры должны являться прототипом сопрягаемой детали и контролировать одновременно все связанные друг с другом размеры проверяемого изделия, а непроходимые – иметь контакт, приближающийся к точечному, для того, чтобы проверить один из размеров отдельно.

*Маркировка калибров.* На калибры наносят следующую маркировку:

- номинальный размер изделия, для которого предназначены калибры;
- условное (буквенное) обозначение предельных отклонений изделия (поле допуска и квалитет);
- величины предельных отклонений в мм (на гладких рабочих калибрах);
- обозначение калибра;

- товарный знак завода-изготовителя.

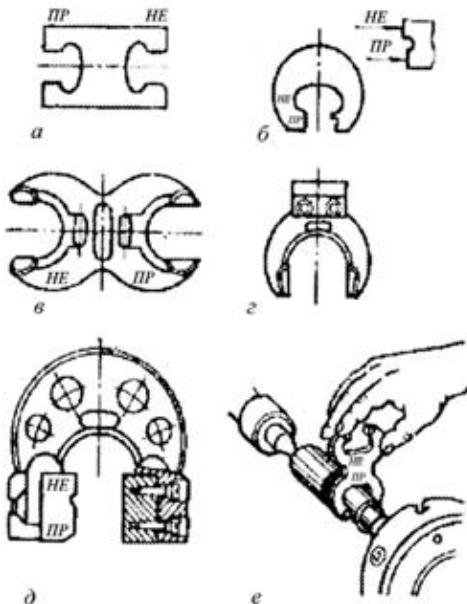


Рис. 61. Калибры для проверки валов:  
 а — скоба листовая двусторонняя;  
 б — скоба листовая односторонняя;  
 в, г — скобы литые; д — скоба регулируемая;  
 е — схема контроля вала скобой

(рис. 62,д) цилиндрической поверхностью, а также нутромеры сферические. Допускаемая шероховатость поверхности калибров не должна превышать 10 % от допуска на размер калибра, но не более  $R_a = 0,16$  мкм.

Деталь считается годной, если ПР сторона калибра под легким давлением входит в деталь, а сторона НЕ – не входит. Деталь считается годной, если проходная сторона скобы под давлением своего веса проходит через вал, а непроходная – не проходит.

*Резьбовые калибры* – применяются для контроля внутренней и наружной резьбы.

Для контроля внутренней резьбы – калибры-пробки, для наружной резьбы – калибры-кольца, жесткие и регулируемые. В производственной практике применяются также резьбовые скобы.

Технические требования на резьбовые калибры диаметром от 1 до 300 мм (пробки и кольца) для контроля:

Маркировку наносят на ручках калибров-пробок и на корпусах скоб. Калибры для контроля гладких валов и отверстий применяют двух видов:

- калибры-скобы – для проверки валов (диаметром от 1 до 360 мм по ГОСТ 2015–69 не регулируемые (рис. 61,*a* – *г*) и диаметром до 340 мм по ГОСТ 2216–68 – регулируемые (рис. 61,*д*);

- калибры-пробки – для проверки отверстий (диаметром от 0,1 до 360 мм по ГОСТ 14807–69...14827–69, ГОСТ 2015–60 (рис. 62).

Есть калибры односторонние и двусторонние.

Калибры-пробки бывают с полной и неполной

- метрические резьбы – ГОСТ 18107–72;
- дюймовой резьбы – ГОСТ 2016–68;
- трубной резьбы – ГОСТ 2533–54;
- трапецеидальной резьбы – ГОСТ 10071–62;
- упорной резьбы – ГОСТ 10177–62.

Для определения размеров резьбовых калибров можно пользоваться ГОСТ 18465–73, ГОСТ 18466–73.

Резьбовые калибры-пробки имеют проходную и непроходную стороны. Резьбовые калибры-кольца состоят из проходного кольца и непроходного кольца. Проходные калибры имеют полный профиль и являются как бы прототипом детали резьбового соединения. Резьбу непроходных колец и пробок делают укороченной до 2...3 витков. Допускается при контроле непроходным калибром частичное вхождение его в изделие (за счет сбега резьбы калибра).

Применяют как одиночные угловые меры, так и составленные в блоки (рис. 63).

Чтобы рабочие поверхности угловых мер обладали свойством притираемости, требования к поверхностям должны быть такими же, как и рабочим поверхностям мер длины. В отличие от концевых мер длины, угловые меры при составлении их в блоки не вно-

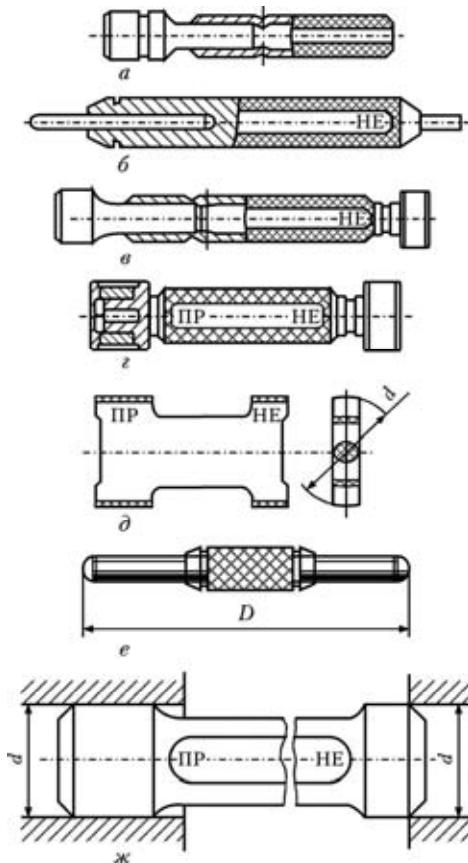


Рис. 62. Калибры для контроля отверстий:  
 а – пробка односторонняя; б – пробка двусторонняя с цилиндрическими вставками; в – пробка двусторонняя со вставками; г – пробка с насадками; д – пробка листовая; е – штихмас; ж – схема контроля отверстия пробки

сят погрешности в суммарный размер блока из-за влияния притирочных слоев. При наборе блоков углы можно складывать и вычитать, что позволяет уменьшить число мер в наборах для перекрытия всего диапазона необходимых углов (рис. 45) и использовать угольники и щупы.

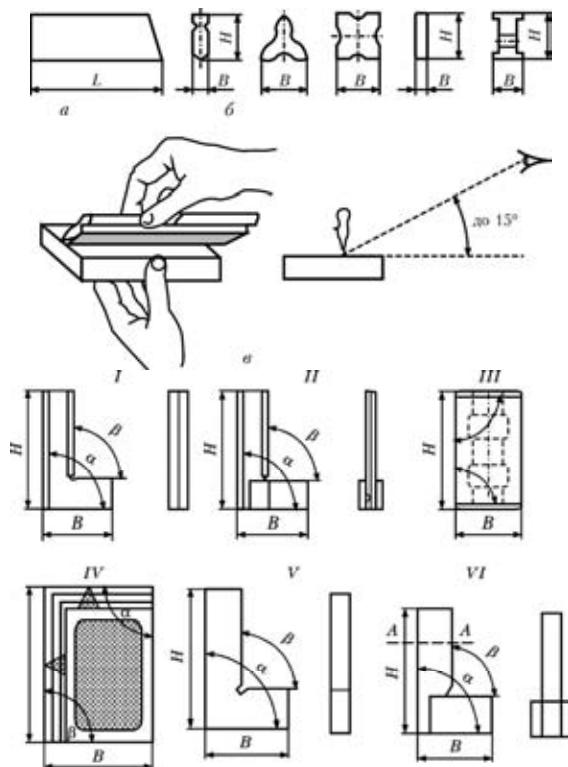


Рис. 63. Линейки и угольники:  
а – вид линейки сбоку; б – профили линеек; в – схема контроля отклонений от плоскостности с помощью линейки; г – угольники

Универсальный угломер применяют для наружных и внутренних углов деталей контактным методом. Измеряют углы угломером путем наложения линеек угломера на стороны детали, образующие измеряемый угол так, чтобы между линейками угломера и сторонами детали не было просвета. Отсчитывают величины по шкале и нониус-

сус. Нулевой штрих нониуса показывает число градусов, а штрих нониуса, совпадающий со штрихом шкалы, число минут (рис. 64, 65).

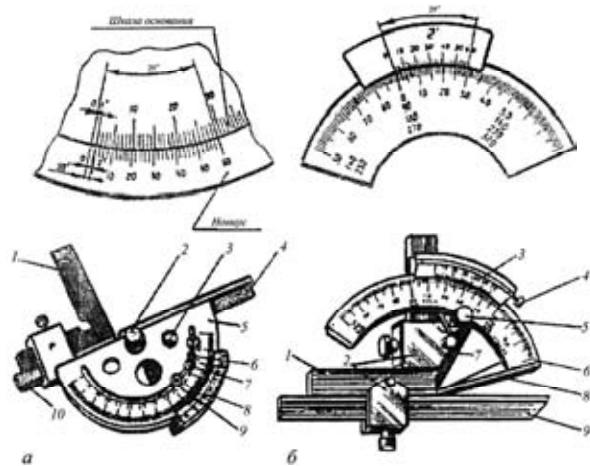


Рис. 64. Угломеры:

*а* – типа УМ (1 – угольник; 2 – ось; 3 – сектор; 4 – линейка съемная; 5 – основание (полудиск); 7 – ганка; 8 – нониус; 10 – линейка подвижная);

*б* – типа УН (1 – угольник; 2 – держатель; 3 – нониус; 4 – винт нониуса; 5 – стопор; 6 – основание; 7 – сектор; 8 – линейка основания; 9 – линейка съемная)

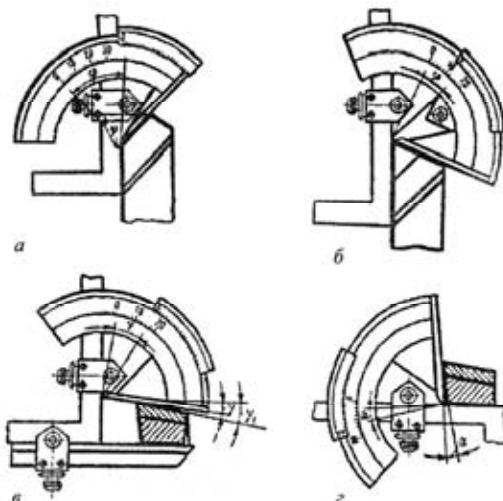


Рис. 65. Универсальный угломер и его применение для измерения углов режущего инструмента: *а* – главного угла в плане; *б* – вспомогательного угла в плане *в* – переднего угла; *г* – заднего угла

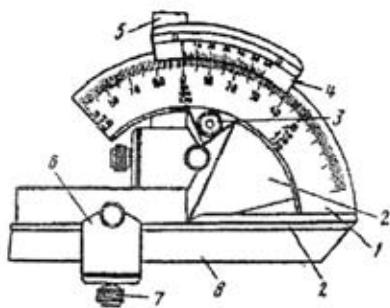


Рис. 66. Угломер с нониусом:

1 – основание; 2 – сектор; 3 – винт микрометрической подачи; 4 – нониус; 5 – угольник; 6 – державка; 7 – за- жимающий винт; 8 – съемная линейка

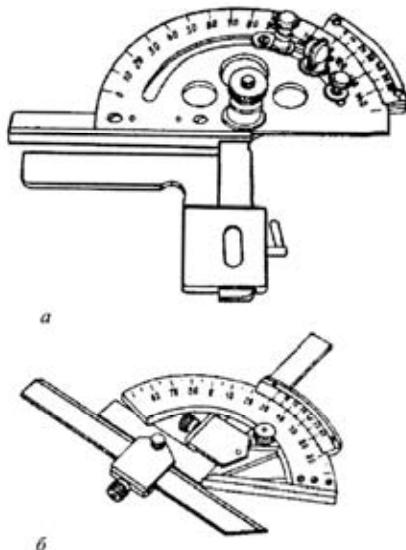


Рис. 67. Угломеры:

a – транспортный типа УМ;  
б – универсальный типа УН

которого укреплены на определенном расстоянии друг от друга (100, 150, 200, 300, 500 мм) с точностью до 1 мм два ролика одинакового диаметра. Оси роликов строго параллельны измерительной

**Транспортный угломер** (ГОСТ 5378–82) типа УМ (I) предназначен для измерения наружных углов (рис. 64). Предел измерений:  $0\ldots180^0$ ; величина отсчета по нониусу:  $2'; 5'; 15'$ ; допускаемая погрешность:  $\pm 2'; 5'; 15'$ .

**Универсальный угломер** типа УН (II) (ГОСТ 5378–82) предназначен для измерения наружных и внутренних углов (рис. 65, 66). Предел измерений: наружные углы  $0\ldots180^0$ ; внутренние углы  $40\ldots180^0$ ; величина отсчета по нониусу:  $2'; 5'$ .

Пример обозначения: Угломер типа 1–2 ГОСТ 5378–82, где 1 – тип, 2 – величина отсчета по нониусу.

**Угольники** (рис. 67) *поворотные*  $90^0$  (ГОСТ 3749–77) применяют для контроля прямых углов, для разметочных работ, а также для контроля взаимного расположения деталей при их сборке в узел или в машину.

**Синусные линейки** (ГОСТ 4046–71) применяют для измерения углов калибров, линеек и точных деталей. Синусная линейка представляет собой прямоугольный бруск, на одной из плоскостей

плоскости бруска  $\sin \varphi = H / L$ , где  $H$  – размер блока концевых мер,  $L$  – расстояние между осями роликов. Определив  $\sin \varphi$ , по таблице находят величину угла  $\varphi$  в градусах.

Синусные линейки бывают различных конструкций, например, с двумя центровыми бабками для измерения конусных изделий в центрах 1 и 2 классов точности. Предел измерений  $0\dots60^0$ .

*Оптические делительные головки* (ГОСТ 9016–77) – предназначены для проверки углов деталей при их обработке и проверке центральных углов различных изделий.

Оптические делительные головки ОДГ-2, ОДГ-5, ОДГ-10, ОДГ-60 имеют предел измерений  $0\dots360^0$ ; величина отсчета по нониусу:  $2''; 5''; 10''; 60''$ ; допускаемая погрешность:  $2'; 5'; 10'; 20'$ .

Универсальный шаблон сварщика (ТУ 102.338-83) УШС-3 (рис. 68) предназначен для контроля качества элементов труб, сборки и сварки стыков при строительстве трубопроводов. Это один из самых распространенных инструментов [11].

Универсальный шаблон сварщика состоит из основания 1, соединенного осью 4 с движком 2 и закрепленного на движке указателем 3.

Измерения проводятся следующим образом.

1. Измерение глубины раковин, глубины забоин, превышения кромок, глубины разделки стыка до корневого слоя, высоту усиления шва производят при установке шаблона поверхностью  $A$  на изделие, затем поворотом движка 2 вокруг оси 4 ввести указатель 3 в соприкосновение с проверяемой поверхностью. Результат считывается против риски 5 по шкале  $\Gamma$  (рис. 68 – 71).

2. Измерение зазора проводится введением движка 2 его клиновой частью в измеряемый зазор. По шкале, нанесенной на движке, считывается результат (рис. 72).



Рис. 68. Универсальный шаблон сварщика типа УШС-3

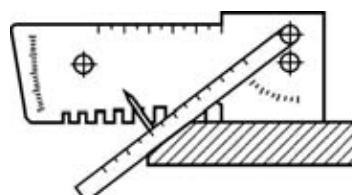


Рис. 69. Измерение угла скоса разделки под сварку

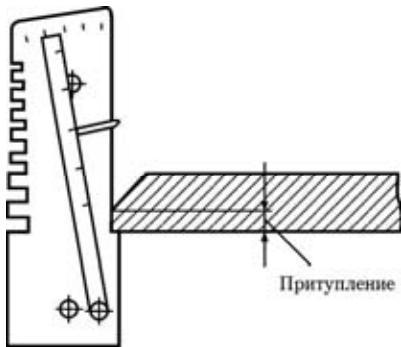


Рис. 70. Схема измерения размера притупления разделки под сварку

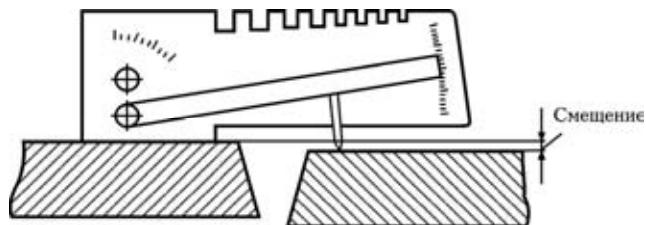


Рис. 71. Схема измерения смещения наружных кромок деталей

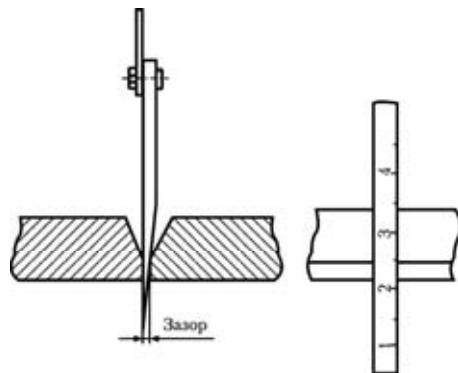


Рис. 72. Схема измерения зазора в соединении перед сваркой

3. Измеряются притупление (рис. 70), ширина шва (рис. 73) при помощи шкалы  $E$ , пользуясь последней как измерительной линейкой.

4. Измерение углов скосов кромок проводится при установке шаблона поверхностью  $B$  (рис. 68) на образующую изделия. Затем, поворотом движка 2 совместить без зазора его поверхность  $B$  с измеряемой поверхностью. Результат считывается по шкале  $D$  против поверхности движка  $B$  (рис. 69).

5. Диаметр проволоки определяется с помощью пазов  $J$  (рис. 68).

Использование универсального сварочного шаблона позволяет производить контроль: глубины раковин – 0...15 мм; глубины заобин – 0...15 мм; углов скоса кромок – 0...45°; величины притупления – 0...50 мм; зазора – 0...4 мм; превышения кромок при сборке – 0...15 мм; диаметров проволоки – 1; 1,2; 2; 2,5; 3; 3,25; 4; 5 мм; глубины разделки стыка до корневого слоя – 0...15 мм; превышения кромок после сварки – 0...15 мм; ширины шва – 0...15 мм; высоты усиления шва – 0...5 мм.

*Средства измерения шероховатости поверхности.* Для измерения величины шероховатости обработанной поверхности применяются различные методы. Наиболее распространенными являются: визуальное определение шероховатости путем сравнения с образцами по ГОСТ 9378-75.

Стандартизованные рабочие образцы выпускаются с различными шероховатостями поверхностей, полученных точением, фрезерованием, строганием, шлифованием, растачиванием, развертыванием, протягиванием, полированием и доводкой.

По видам обработки образцы комплектуются в оправах, и составленные

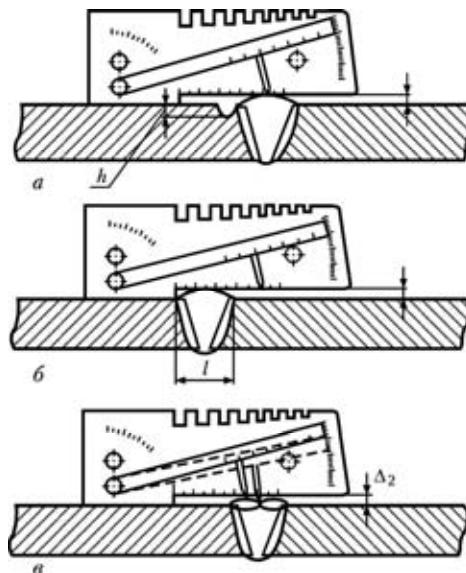


Рис. 73. Схема измерений с помощью шаблона УШС размеров сварного шва:  
а – измерение высоты шва и глубины подреза; б – измерение ширины шва; в – измерение расстояния между валиками

наборы помещаются в различные футляры в зависимости от материала.

При сравнении поверхностей с шероховатостью от  $Ra$  2,5 рекомендуется пользоваться лупой. Образцы должны быть изготовлены из того же материала, что и сравниваемая поверхность, с применением различных видов обработки: точения, фрезерования, шлифования и др. Контроль шероховатости проводится сличением поверхностей. Этот метод считается достоверным только для 4–7 классов шероховатости.

Для измерения шероховатости труднодоступных мест – поверхностей глубоких отверстий, резьбы и др. применяют метод отпечатков (реплик). На измеряемую поверхность накладывают пластический материал для получения четкого отпечатка.

Контроль шероховатости осуществляется сравнением обрабатываемых поверхностей с образцами контактным методом с помощью шуповых приборов (профилометров и профилографов). Профилометры показывают среднее арифметическое отклонение профиля поверхности  $Ra$ , а профилографы – профиль поверхности в виде профилограммы.

Измерения микронеровностей [2] поверхности возможны в пределах 5–14 классов шероховатости, проверяемый максимальный шаг неровностей 3,5 мм.

Наименьший диаметр проверяемого отверстия 8 мм, радиус ощупывания иглы  $0,02^{+0,002}$  или  $0,01^{+0,002}$  мм.

Действие этого прибора основано на принципе ощупывания измеряемой поверхности алмазной иглой с малым радиусом закругления. Измерительное усилие ощупывающей иглы не более 0,1 Гс, поэтому после измерения на проверяемой поверхности не остается видимых царапин.

Перемещение датчика в продольном направлении осуществляется от мотопривода (электродвигателя и коробки скоростей). Самопищий магнитоэлектрический миллиамперметр постоянного тока служит для записи микронеровностей проверяемой поверхности.

Вид обработки поверхности указывают в обозначении шероховатости только в случаях, когда он является единственным применимым для получения требуемого качества поверхности.

Качество поверхности также определяется волнистостью, которая характеризуется неровностями в виде периодически повторяющихся волн, на вершинах которых расположены микронеровности – следы обработки. К волнистости также относятся гранность и дроб-

ленность. Основными причинами появления волнистости – неравномерность процесса резания, различные величины снимаемых припусков, вибрации, возникающие в процессе резания и др.

Параметр шероховатости указывают в обозначении без символа, если используется среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$ , например 0,63; для обозначения  $R_z$ ,  $R_{max}$ , параметр указывается после соответствующего символа, например,  $R_z 40$ ,  $R_{max} 80$ .

#### 4. Некоторые нестандартные приемы и порядок измерений

*Условия, определяющие выбор измерительных средств.* Средства измерения выбирают с учетом метрологических, эксплуатационных и экономических показателей. Каждое измерительное средство позволяет проводить измерения с определенной предельной погрешностью, которая указывается в паспортных данных. Средства измерения выбирают в зависимости от допустимой погрешности измерения, установленной ГОСТ 8.051-81 для конкретного интервала номинальных размеров при заданной точности контролируемого изделия. При подсчете допустимой погрешности измерений она принимается равной 1/5...1/3 допуска на размер.

Для повышения точности измерений необходимо:

- использовать более точное измерительное средство;
- устанавливать шкалу в нулевое положение по концевой мере более высокого разряда;
- доверять измерения специалистам более высокого уровня квалификации;
- выравнивать температуру измерительного средства и измеряемого изделия при нормальной температуре 20  $^{\circ}\text{C}$ ;
- проводить измерения несколько раз и принимать за действительный размер среднее значение;
- выполнять рекомендации по обращению с измерительными средствами.

Рекомендуется проверить наличие документа о его поверке, проводимой по графику.

Перед началом работы измерительное средство нужно протереть чистой мягкой тканью, особенно тщательно измерительные поверхности, и проверить установку на нуль.

При измерении не допускается проводить измерительными поверхностями по поверхностям деталей, не рекомендуется долго

держать в руке измерительный инструмент, так как нагрев всех его частей вызывает дополнительную погрешность измерений.

При проведении измерений измерительные средства не рекомендуется класть на металлические поверхности станков и т.п., в конце работы нужно протереть их, смазать антакоррозионным составом и уложить в футляры. Наносить удары по измерительному инструменту и ронять его строго запрещается.

*Измерение больших длин и диаметров* [1]. Прямые измерения больших длин и диаметров осуществляют с помощью скоб, штангенциркулей, масштабных линеек, рулеток, лазерных измерителей различных типов и конструкций.

Предельная погрешность измерения линейками и рулетками включает следующие составляющие:

- погрешность  $\delta_1$ , которая равна допустимому отклонению длины шкалы для рулеток 3-го класса точности при номинальных длинах шкал 1 и 5 м составляют соответственно 0,4 мм и 2 мм;
- погрешность отсчета по шкале  $\delta_2 \approx 0,3$  мм;
- температурная погрешность не нормирована;
- погрешность  $\delta_3$  от смещения  $\Delta$  линейки (рулетки) от линии измерения;
- погрешность от непостоянства усилия прижатия;
- погрешность от провисания ленты.

В общем случае предельные погрешности ( $\pm$ ) измерения рулетками для интервалов размеров измеряемых изделий от 0,5 до 1,0 м, от 1,0 до 2,0 м, от 4 до 5 м, от 8 до 10 м соответственно составляют 0,5; 0,75; 2; 2,5 мм.

Косвенные измерения больших длин и диаметров осуществляются главным образом при размерах измеряемых изделий свыше 2 м и до 20...30 м. Точность косвенных измерений, как правило, меньше, чем прямых, поэтому к ним прибегают, когда выполнение прямых измерений невозможно или сложно.

Рассмотрены кратко косвенные методы измерения больших диаметров и длин. Эти измерения проводятся от дополнительных баз с использованием накладных приспособлений для измерения по элементам круга.

*Измерения от дополнительных баз.* Измерения осуществляют с помощью специальных упоров, колонок, поверхностей измеряемой детали. Так, при измерении внутреннего диаметра по рис. 74  $D = d + l_1 + l_2$ , а предельная погрешность измерения

$\delta D = \sqrt{\delta d^2 + \delta l_1^2 + \delta l_2^2}$ ; при измерении наружного диаметра по рис.

$$74 \quad D = 2(l_1 + \frac{d}{2} - l_2), \quad \delta D \approx \sqrt{\delta l_1^2 - \delta l_2^2}.$$

*Метод опоясывания.* Сущность этого метода заключается в определении наружного диаметра  $D$  изделия по результатам измерения длины окружности  $l$  рулеткой (рис. 75, а) или металлической лентой (рис. 75, б) с угольниками для натяжения на концах.

При измерении рулеткой

$$D = l/\pi - t,$$

где  $\pi = 3,1416$ ;  $t$  – толщина ленты рулетки, мм. Длина окружности определяется как разность отсчетов по двум ветвям рулетки в любом месте их совпадения.

При измерении лентой

$$D = (l + a)/\pi,$$

где  $l$  – длина ленты, мм;  $a$  – зазор между концами ленты, мм, определяемый с помощью щупов.

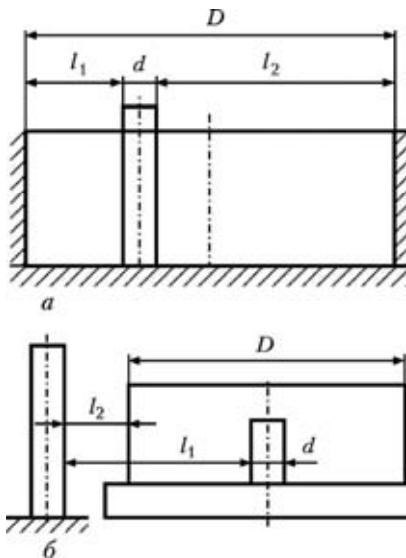


Рис. 74. Типовая схема измерения от дополнительных баз внутренних (а) и наружных (б) диаметров

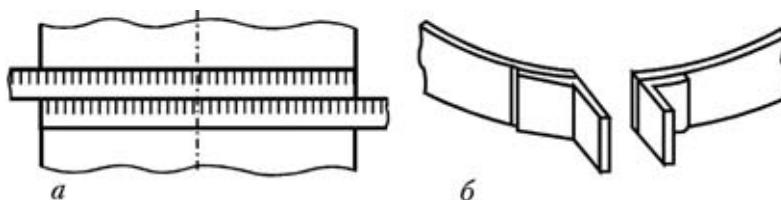


Рис. 75. Определение наружного диаметра:  
а – рулеткой; б – металлической лентой с угольником

Предельные погрешности измерения наружных диаметров изделий методом опоясывания с помощью рулеток в интервалах раз-

меров измеряемых деталей от 2 до 10 м составляет около 1 мм, а с помощью лент – 0,15 мм.

*Метод с использованием приборов для измерения по элементам круга.* Основное преимущество таких приборов перед скобами – меньшие габариты и масса, а также больший диапазон измерения. Накладные приспособления могут применяться для измерения изделий диаметром до 5 м. При измерении указанными приборами диаметр определяется косвенно по результатам измерения двух линейных элементов или одного линейного и одного углового. Один из исходных элементов, как правило, является постоянным или регулируемым и обеспечивается конструкцией прибора, а второй элемент измеряется прибором.

К приборам указанного типа, измеряющим длину хорды при постоянной высоте сегмента, относится обыкновенный штангенциркуль (рис. 76). При измерении штангенциркулем

$$D = L^2/(4H) + H,$$

отклонение диаметра

$$\Delta D = \Delta L/(2H),$$

где  $\Delta L$  – отклонение измеряемой величины.

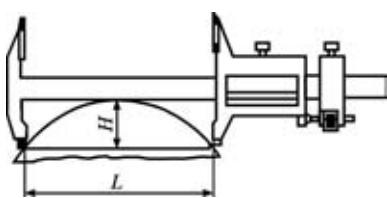


Рис. 76. Измерение диаметра по хорде и высоте сегмента с помощью штангенциркуля

Ниже кратко описаны некоторые из средств контроля отклонений формы и расположения поверхностей.

*Средства измерений отклонений от круглости.* Отклонения от круглости могут измеряться с помощью двух- и трехконтактных механических приборов, кругломеров и специальных приборов. С помощью двухконтактных приборов типа микрометров, индика-

Предельные погрешности измерения диаметров по хорде и высоте сегмента в зависимости от способа настройки прибора и интервалов размеров измеряемых деталей (от 500 до 5000 мм) составляют от 10 до 900 мкм.

*Методы и средства контроля отклонений формы и расположения поверхностей.*

торных скоб, нутромеров и т.п. могут быть оценены овальность и огранка деталей с четным числом граней.

При измерении отклонений от круглости необходимо выбрать плоскость измерения и количество направлений измерения в каждой плоскости. Если она не задана, то измерения проводят в нескольких плоскостях. Число плоскостей для задач контроля отклонений от круглости может определяться в соответствии с табл. 30.

**Таблица 30. Выбор числа плотностей измерений**

$L$ , мм	До 50			Свыше 50 до 200			Свыше 200		
$l/d$	До 1	Св. 3 до 3	Св. 3	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3	До 1	Св. 1 до 3	Св. 3
$N$	1	2	3	2	3	4	3	4	5

Здесь  $l$  – длина измеряемой цилиндрической поверхности;  $l/d$  – соотношение длины и диаметра измеряемой поверхности;  $N$  – число плоскостей измерения.

При этом первое и последнее сечение должны иметь расстояние  $l/(2N)$  от края, а расстояние между сечениями принимается равным  $l/N$ .

Если поворачивать деталь в процессе измерения не представляется возможным, овальность и четную огранку с любым числом граней, кроме числа, кратного шести, можно приблизительно оценить, измеряя диаметры в трех направлениях через  $60^\circ$ .

Огранка с нечетным числом граней может быть определена с помощью трехконтактных устройств с двумя опорными и одним измерительным контактом, например, при повороте детали на призме и измерении отклонений измерительной головкой (рис. 77) или с помощью наладочного прибора седлообразного типа.

Кругломеры представляют собой приборы, основанные на методе прецизионного

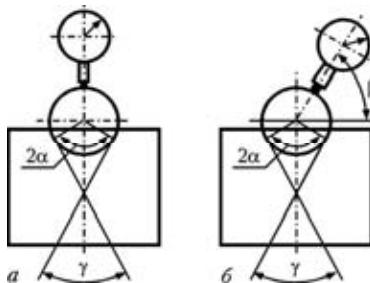


Рис. 77. Схема измерения огранки с нечетным числом граней:  
а, б – симметричное и несимметричное устройство соответственно

вращения измерительного наконечника относительно неподвижной детали или детали относительно неподвижного наконечника. Кругломерами можно контролировать детали диаметром до 2 м и высотой до 1600 мм с погрешностью измерения 0,1 мкм.

*Средства измерения отклонений от прямолинейности и плоскостности.* Для измерения отклонений от прямолинейности и плоскостности применяют следующие методы:

- механические (измерение с помощью поверочных линеек, плит, натянутой струны, карусельного плоскомера);
- гидростатические (измерение методом свободно налитой жидкости, сообщающихся сосудов и с помощью уровня);
- оптико-механические (автоколлимационные и коллимационные методы, метод визирования);
- оптические (измерение плоскими стеклянными пластинами и интерферометрами).

*Измерения отклонений от прямолинейности поверочными линейками способом «на просвет» и методом линейных отклонений.* При контроле на просвет лекальную линейку рабочим ребром помещают на контролируемую поверхность и на глаз оценивают просвет между ними. Погрешность контроля этим методом 1...2 мкм при просветах до 5 мкм и 2...3 мкм при просвете до 10 мкм. Для зазоров более 10 мкм метод не рекомендуется.

При контроле плоскомерами карусельного типа по длине измеряемых поверхностей от 400 до 1000 мм предельные погрешности измерения отклонений от прямолинейности находятся в пределах от 3 до 5 мкм, а при контроле с использованием рамных и брусковых уровней указанная выше погрешность составляет 2...3 мкм.

При измерении с помощью уровня последний устанавливают на шаговом мостике и мостик (микронивелир) переставляют по контролируемой поверхности в направлении линии измерения так, чтобы задняя опора при каждой перестановке устанавливалась на место передней (рис. 78). Подъем или опускание передней опоры вызывает соответствующее смещение пузырька уровня, определяемое по шкале ампулы. Предельные погрешности измерения отклонений от прямолинейности с использованием уровней 2...50 мкм.

При измерении отклонений от прямолинейности и плоскостности шаговым методом с помощью оптического автоколлиматора или коллиматора измеряются углы наклона участков поверхности, на которых последовательно располагаются опоры шагового мостика (рис. 79).

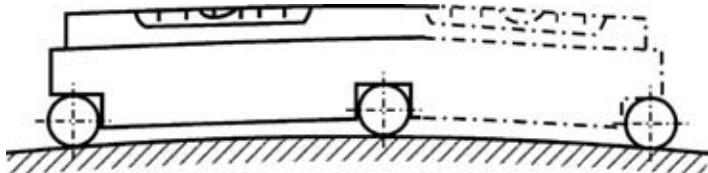


Рис. 78. Измерение с помощью уровня

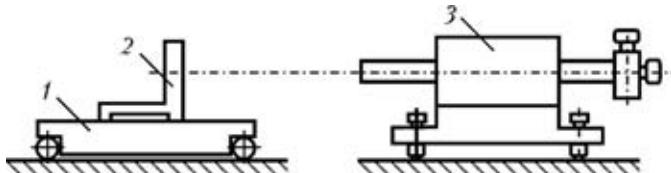


Рис. 79. Измерение отклонений от прямолинейности:  
1 – мостик; 2 – зеркало; 3 – автоколлиматор

Предельные погрешности измерения отклонения от прямолинейности при использовании этих оптических приборов для длин измеряемых поверхностей от 400 до 1000 мм от 1,0 до 10 мкм.

*Измерение отклонений расположения поверхностей.* К отклонениям расположения относятся отклонения от параллельности плоскостей и осей (или прямых), отклонения от перпендикулярности, отклонения от соосности, симметричности, пересечения осей, радиальные и торцовые биения.

Отклонения от параллельности плоскостей могут быть измерены с помощью измерительной головки, закрепленной в универсальном штативе, уровне, специальных измерительных приспособлений, автоколлиматора и зеркала, коллиматора и визирной трубы и т.п.

При измерении уровнем по схемам рис. 80:

$$\Delta x(\Delta y) = \frac{nc}{1000} L,$$

$$\Delta x(\Delta y) = \frac{nc}{1000} l,$$

где  $n$  – разность показаний уровня в числах деления шкалы;  $c$  – це-на деления шкалы уровня, мм/м;  $L$  – заданная длина измерения, мм;  $l$  – расстояние между осями, мм.

Измерение отклонений от перпендикулярности может осуществляться с помощью угольника и плоскопараллельных концевых мер длины или щупов, измерительной головки, закрепленной на штативе, угольника (рис. 80) и других специальных приспособлений.

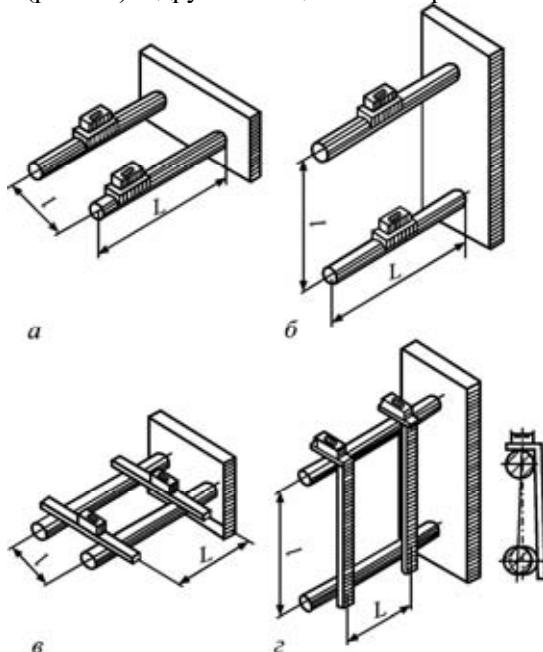


Рис. 80. Измерение отклонений от параллельности уровнем

## 5. Применение приборов при визуально-измерительных процедурах, ложные изображения

Приборы цехового назначения, как правило, применяются при незначительных колебаниях температуры в пределах +15 до +20  $^{\circ}\text{C}$ , при практически постоянном атмосферном давлении, невысокой и мало измеряющей влажности, при относительно постоянных механических воздействиях. В полевых условиях приборы эксплуатируются при колебаниях температуры от +55 до -60  $^{\circ}\text{C}$ , при значительной тряске во время перевозок, сильных вибрациях и ударах. Некоторые приборы испытывают воздействие воды, снега, паров органических растворителей и топлива, а также высокой температуры.

В приборах должны быть предусмотрены устройства для уменьшения отрицательного влияния колебаний температуры и воздействия рассеянного света на глаза контролера (блонды, диафрагмы, светопоглощающая отделка деталей), а также для устойчивого и прочного крепления деталей и узлов. Не допускается применение оптических приборов, отдельные элементы которых могут самопроизвольно отделяться и попадать во внутрь конструкции объекта. Полости многоэлементных оптических приборов должны иметь достаточную герметизацию. В приборах, используемых в полевых условиях, должны применяться коррозионностойкие материалы и атмосферостойкие защитные покрытия.

Удобство применения оптических приборов в эксплуатации достигается:

- удобным расположением окуляров, применением наглазников (налобников), защищающих глаза от попадания постороннего света и снижающих утомление глаз;
- применением бинокулярных насадок, что помимо повышения удобства работы улучшает также разрешающую способность зрения и снижает утомляемость глаз при использовании приборов;
- удобным расположением и формой рукояток управления и четкой фиксацией их в нужных положениях;
- наличием указателей взаимного положения подвижных частей приборов;
- возможностью легкой замены быстро изнашивающихся деталей;
- малой массой и удобством переноски приборов, возможностью их быстрого перевода из транспортного положения в рабочее и обратно.

Материал оболочки эндоскопов должен иметь малый коэффициент трения с металлом. На эндоскопах не должно быть выступающих элементов и резких переходов в сечении погружаемой части, затрудняющих их ввод в проверяемые механизмы и вывод оттуда.

Особо следует отметить необходимость применения бинокулярных насадок. Бинокулярное зрение предпочтительнее при визуально-оптическом контроле, чем монокулярное, в первую очередь при контроле деталей и узлов сложной формы. Оно обеспечивает более правильное восприятие пространства, объема и формы рассматриваемых объектов, позволяет точнее оценивать их взаимное расположение. Это важно как для обнаружения дефектов, так и для

различения действительных и ложных дефектов. При бинокулярном зрении контролер обладает более высокой чувствительностью к различию яркости элементов поверхности деталей и узлов. Осмотр двумя глазами менее утомителен, чем одним, вследствие защиты глаз от попадания постороннего света. Поэтому более высокая эффективность и достоверность контроля достигаются при использовании бинокулярных приборов, в том числе эндоскопов с бинокулярными насадками, обеспечивающих стереоскопический эффект при осмотре.

Использование оптических приборов позволяет увеличить изображение дефектов и обеспечить контроль областей, недоступных непосредственному осмотру. Визуальные оптические приборы по назначению разделяются на три группы:

- 1) приборы для контроля близко расположенных объектов, т.е. деталей и узлов, находящихся от глаза контролера в пределах расстояния наилучшего зрения – до 250 мм;
- 2) приборы для удаленных объектов, т.е. расположенных далее 250 мм;
- 3) приборы для контроля деталей, закрытых от прямого наблюдения другими деталями.

При контроле близко расположенных объектов применяют лупы различных типов, представляющих собой короткофокусную двояковыпуклую линзу или систему линз, действующих как одна собирающая линза. Лупы позволяют увеличивать угловой размер рассматриваемого объекта. Острота зрения и разрешающая способность при их использовании увеличиваются во столько раз, во сколько увеличивает оптический прибор. Это позволяет видеть мелкие объекты, размеры которых находятся за пределами границы видимости невооруженного глаза. Вследствие этого, казалось бы, для осмотра деталей необходимо применять оптические приборы как можно большего увеличения. Однако, при повышении увеличения сокращается поле зрения, уменьшается глубина резкости. В связи с этим применяют оптические приборы небольшого увеличения, обычно в пределах от 1,5 до 10 крат.

Наиболее широко используют обзорные, складные, карманные и бинокулярные налобные лупы типа ЛПК-471, ЛПК-470 и др. с большим полем зрения. Они позволяют проводить общий осмотр больших поверхностей при увеличении 1,25...2 крат.

Бинокулярные налобные лупы БЛ-1 и БЛ-2 имеют увеличение 1,25...2 крат. Лупа БЛ-2 снабжена осветителем с лампой накаливания

ния. Эти лупы применяют в тех случаях, когда при осмотре деталей требуется, чтобы руки были свободны и т.п.

При контроле удаленных объектов применяют оптические приборы с телескопической системой – телескопические лупы и бинокли. Например, телескопическая лупа ЛПШ-474, представляющая собой четырехкратный призменный монокуляр. На его объектив надеваются сменные объективы-насадки, в зависимости от увеличения которых изменяется общее увеличение лупы от 1 до 40 крат и рабочее расстояние от 25 мм. Одновременно с этим уменьшается световой диаметр и линейное поле зрения лупы.

Бинокли применяют в основном для осмотра элементов конструкции крупногабаритных кранов и тяжелых самолетов. Используются как призменные, так и галилеевские бинокли с увеличением от 3 до 18 крат. Бинокли наиболее эффективны при осмотре деталей, находящихся в пределах видимости на расстоянии более 3,5...5 м. Телескопические лупы и бинокли позволяют обнаруживать течи емкостей и систем, разрушения деталей и конструкций, крупные трещины, остаточную изгибную деформацию, продукты коррозии и другие дефекты на деталях и узлах, находящихся в пределах прямой видимости, но расположенных на значительном удалении от контролера.

Скрытые детали осматривают с помощью оптических зондов или эндоскопов. Оптический зонд представляет собой простейший прибор без замкнутого корпуса. Для отклонения луча зрения в зонде используются зеркала. Эти приборы имеют малую массу и автономный источник питания осветителя. Однако, они не создают увеличенного изображения осматриваемого объекта.

Эндоскопы создают увеличенное, как правило, в 1,5...2,5 крат изображение и имеют диаметры от 2,5 до 20 мм и длину до нескольких метров. Обычно их оптическая система способна обеспечивать разное направление осмотра: прямое, под прямым углом, под косым углом и ретроспективное.

Изображение объекта, создаваемое объективом жесткого эндоскопа с помощью промежуточных линз и призм проходит через телескопическую трубу и рассматривается с помощью окуляра. Окуляры чаще всего являются сменными, рассчитанными на различное увеличение.

Для осмотра деталей и конструкций с внутренней поверхностью сложной формы применяют эндоскопы с переменным углом наблюдения, около объектива которых установлены качающиеся

управляемые призмы. Осматриваемые полости освещают с помощью осветителей, размещаемых на конце эндоскопа перед объективом, либо с помощью внешних осветителей с лампами большой мощности (до 500 Вт), свет от которых в зону осмотра передается по жестким или гибким световодам.

Эндоскопы обычно имеют мощный внешний осветитель, свет от которого в зону осмотра передается по жгуту волокна с нерегулярной укладкой, а также систему управления для дистанционного изгибаия ствола эндоскопа в одной или двух плоскостях и изменения направления осмотра.

Большинство эндоскопов имеют объектив с широким углом зрения, обеспечивающим поле зрения в  $100^0$  при повороте конца прибора на  $+90^0$  или  $+120^0$ . Все они оборудованы системой управления фокусным расстоянием для наводки на резкость при большом диапазоне рабочих расстояний. Рабочая длина гибких эндоскопов обычно составляет от 0,6 до 3,7 м при диаметре от 3 до 13 мм. Для осмотра деталей наиболее часто применяют эндоскопы типов ЭЛГ, 1F-6D-1-10, 1F-8D-3-15, 1F-11D-3-10.

Оптические зонды и эндоскопы различной конструкции позволяют обнаруживать разрушения скрытых деталей и узлов, крупные трещины, остаточную изгибную деформацию деталей, нагар, продукты коррозии, течи емкостей и систем, надиры, возникающие на внутренней поверхности полых деталей, следы повреждений в труднодоступных местах конструкций. В наибольшем объеме эндоскопы используются для контроля деталей газовоздушного тракта газотурбинных двигателей.

Эффективность визуально-оптического контроля в большой степени зависит от освещенности осматриваемых деталей и направления освещения. Детали освещают переносными лампами, например, ПЛ-36 или ПЛ-64. Темные детали, а также детали, удаленные от глаз контролера на расстояние более 250...300 мм, лучше освещать лампой-фарой (например, ФР-100). Во всех случаях визуально-оптического контроля необходимо обеспечивать высокую освещенность деталей – до 3000...4000 лк.

При нормальном освещении деталей, т.е. перпендикулярном осматриваемой поверхности, можно хорошо различать риски и другие следы скольжения. Эти углубления обычно зеркально отражают свет, а валики металла вокруг них имеют шероховатую поверхность и поэтому отражают свет диффузно. Линии трещин зеркально свет не отражают и при нормальном освещении отличаются

от рисок. Для повышения контраста темных дефектов на светлой поверхности металла можно кратковременно применять такое направление освещения деталей, при котором в поле зрения попадает максимум отраженных лучей. Длительное применение такого освещения не допускается из-за ослепления и быстрой усталости глаз. Боковое или наклонное освещение увеличивает впечатление рельефа вследствие появления теней от неровностей.

При этом освещении на светлой поверхности металла легче обнаруживать поры, коррозионные язвы, заусенцы и другие повреждения, вызывающие изменение микрорельефа поверхности.

Контроль начинают с малых увеличений. Это дает возможность выбрать на детали опасный или подозрительный участок, оценить его состояние и обнаружить крупные повреждения. Малое увеличение облегчает наводку на резкость и выбор освещения. После исходной установки прибора и грубой наводки на резкость уточняют фокусировку и осматривают зону контроля. Затем при необходимости осмотр повторяют при большем увеличении.

Бинокль укрепляют на съемном кронштейне. Ротор двигателя при осмотре лопаток медленно врачают. На входных кромках лопаток компрессора обнаруживают, как правило, забоины различной формы и размеров.

Направляя свет переносной лампы на зеркало, висящее в зазоре между лопatkами ротора и статора двигателя, освещают выходные кромки контролируемых лопаток отраженным от зеркала светом. Вращая ротор, последовательно осматривают выходные кромки всех лопаток.

Визуально-оптический метод в основном используют для осмотра лопаток на отсутствие забоин, деформации кромок, прогаров, оплавления, вспучивания материала и других дефектов.

На одном двигателе приходится осматривать 600...800 рабочих лопаток турбины и компрессора и столько же лопаток статора. К этому следует добавить форсунки, корпуса и кольца камер сгорания, жаровые трубы, штуцера подвода топлива, стабилизаторы пламени, завихрители и другие детали.

Осмотр деталей с применением оптических приборов требует особых навыков, умения правильно анализировать получаемое изображение. Главный из этих навыков – способность различать действительные и ложные трещины. Ложные трещины – это небольшие допустимые повреждения или загрязнения поверхности деталей, внешне схожие с трещинами. Например, на лопатках ком-

прессора могут быть обнаружены следующие ложные образования, намагничивающие трещины:

- смолистые отложения – линейные следы полимеризованного масла темно-коричневого цвета, вытянутые по направлению воздушного потока, т.е. от оси к периферии двигателя и от входной кромки к выходной;

- язвенная коррозия в виде близко расположенных язв, сливающихся в линию;

- шлейфовая коррозия – местная линейная поверхностная коррозия в виде шлейфа, вытянутого по направлению воздушного потока. Такая коррозия обычно развивается в местах наличия точечных повреждений или загрязнений поверхности лопаток, вызывающих возмущение пограничного слоя воздушного потока;

- волосовидные отложения пыли.

Для того чтобы отличить действительную трещину от ложной, необходимо знать основные признаки действительных трещин и использовать их при анализе оптического вида. Надо обращать внимание на следующие признаки: место расположения изображения на детали и направление распространения его рисунка. Например, на лопатках турбины и компрессора усталостные трещины чаще всего развиваются на входных или выходных кромках и направлены перпендикулярно кромкам. Ложные изображения в виде загрязнений, смолистых отложений или коррозионных поражений чаще всего вытянуты по направлению воздушного потока.

Действительные трещины всегда имеют черный цвет. Цвет ложных трещин может отличаться от черного: отложения пыли могут быть серого или желто-серого цвета, смолистые отложения – темно-коричневого, продукты коррозии стадии – буро-красного и т.д.

Действительные трещины, как правило, имеют характерные изломы и изгибы. Отложения пыли, шлейфовая коррозия, смолистые отложения имеют вид прямых или плавно изгибающихся линий, без изломов.

В зоне действительных трещин малого раскрытия поверхность детали не имеет каких-либо изменений, над крупными трещинами может быть видна впадина. Смолистые отложения, волокна ветоши, полосы пыли слегка выступают над поверхностью детали. В местах сколов окисной пленки наблюдается уступ.

## **XIV. ПОДГОТОВКА РАБОЧИХ МЕСТ И ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Визуальный и измерительный контроль при производстве работ, как правило, должен выполняться на стационарных участках, которые должны быть оборудованы столами, стендами, роликоопорами и др. средствами, обеспечивающими удобство выполнения работ.

Визуальный и измерительный контроль при монтаже и ремонте оборудования и трубопроводов выполняется непосредственно по месту монтажа или расположения изделия. В этом случае должно быть обеспечено удобство подхода лиц, выполняющих контроль, к месту, созданы условия для безопасного производства работ. Должны быть оборудованы леса, ограждения, подмостки, безопасное подключение ламп местного освещения напряжением 12 вольт.

Участки контроля следует располагать на наиболее освещенных местах цеха, имеющих естественное освещение. Независимо от наличия естественного освещения участки контроля должны быть оборудованы также искусственным освещением, обеспечено подключение переносных осветительных приборов. Освещенность должна соответствовать требованиям ГОСТ 23479 и составлять не менее 300 лк.

Окраску поверхностей стен, потолков, рабочих столов и стендов на участках визуального и измерительного контроля рекомендуется выполнять в светлых тонах (белый, голубой, желтый, светло-зеленый, светло-серый) для увеличения контрастности контролируемых поверхностей деталей (сборочных единиц, изделий), повышения контрастной чувствительности глаза, снижения общего утомления лица, выполняющего контроль.

Подготовка объектов к контролю проводится подразделениями предприятия, выполняющими монтаж или ремонт. Подготовкам объектов к техническому диагностированию выполняется организацией, которой принадлежит диагностируемый объект. Подготовка изделий к контролю в обязанности специалиста по контролю не входит.

Паровые и водогрейные котлы, сосуды и трубопроводы перед контролем должны быть выведены из работы, охлаждены, отключены от трубопроводов, внутренние устройства сосудов в случае необходимости должны быть удалены. Тепловая изоляция, препятствующая оценке технического состояния основного металла и сварных соединений, должна быть частично или полностью удалена в местах, оговоренных программой работ по техническому диагностированию.

Поверхность объекта в зоне контроля подлежит зачистке до чистого металла от загрязнений, препятствующих проведению контроля. Зона зачистки должна определяться НТД и составлять:

- для кромок деталей под дуговую и газовую сварку – не менее 20 мм с наружной стороны и не менее 10 мм с внутренней стороны от кромок разделки детали;

- при зачистке кромок деталей под электрошлаковую сварку – не менее 50 мм;

- при зачистке кромок деталей угловых соединений труб (вварка штуцера в коллектор, трубу или барабан) – зачистке подлежат: поверхность вокруг отверстия в трубе (коллекторе, барабане) на расстоянии 15...20 мм, поверхность привариваемого штуцера – не менее 20 мм от кромки разделки;

- при зачистке стального подкладного остающегося кольца или расплавляемой проволочной вставки – вся наружная поверхность подкладного кольца и все поверхности расплавляемой вставки;

- при зачистке сварного шва деталей – шов и прилегающие к нему участки основного материала деталей; ширины зоны зачистки основного материала должны составлять не менее 20 мм в каждую сторону от шва при всех видах дуговой и газовой сварке и не менее 100 мм – при электрошлаковой сварке.

Перед контролем поверхность деталей зачищается металлическими щетками, напильником или абразивным кругом.

Шероховатость заищенных под контроль поверхностей деталей (сварных соединений) должна составлять не более  $Ra$  12,5 ( $Rz$  80).

Шероховатость поверхностей изделий и сварных соединений для проведения последующих видов контроля неразрушающими методами зависит от метода контроля и должна быть не более:

$Ra$  3,2 ( $Rz$  20) – при капиллярных методах контроля;

$Ra$  10 ( $Rz$  63) – при магнитопорошковом методе контроля;

$Ra$  6,3 ( $Rz$  40) – при ультразвуковом методе контроля.

Для других методов неразрушающего контроля шероховатость контролируемых поверхностей изделий не регламентируется.

Шероховатость поверхностей разделки кромок деталей (сборочных единиц, изделий), подготовленных под сварку, должна быть не более  $Ra$  12,5 ( $Rz$  80).

Задачей визуального контроля основного материала, полуфабрикатов и заготовок, предназначенных для изготовления деталей и сборочных единиц и ремонта изделий, является выявление участков металла с трещинами, выходящими на поверхность, расслоениями, закатами, забоинами (вмятинами), рванинами, раковинами, пленами, шлаковыми включениями и другими несплошностями, вызванными технологией изготовления или транспортировкой, а также подтверждение наличия и правильности маркировки.

Задачей измерительного контроля полуфабрикатов и заготовок, предназначенных для изготовления деталей, сборочных единиц и изделий, а также ремонта изделий является подтверждение их геометрических размеров и определение размеров поверхностных дефектов, выявленных при визуальном контроле.

Измерительный контроль сварных швов выполняется на участках сварных швов, проконтролированных визуально. Измерение сварного шва проводится на каждом участке, проконтролированном визуально, но не менее чем в трех сечениях по длине шва. Поверхностные дефекты измеряются в местах, отмеченных при визуальном контроле.

Кромки литых деталей, подлежащие сварке, визуально следует контролировать на участке шириной не менее 100 мм по всей длине. Кромки элементов изделий (деталей), имеющих наплавку, должны подвергаться визуальному контролю по всему периметру. Контролю подлежит каждая кромка с наплавкой.

Измерительный контроль изделий проводится с целью определения размеров сварных швов, допустимости размеров поверхностных дефектов, а также соответствия основных размеров изделий (деталей, сборочных единиц) требованиям стандартов, ТУ и чертежам изделий.

## **XV. ПРОВЕРКА ПОДГОТОВКИ И СБОРКИ ДЕТАЛЕЙ ПОД СВАРКУ**

При подготовке деталей под сварку необходимо проверить:

- наличие маркировки и документации, определяющей правила приемки полуфабрикатов, деталей, сборочных единиц и изделий при входном контроле;
- наличие маркировки предприятия-изготовителя материала на деталях, подготовленных под сварку;
- форму обработки кромок, в т.ч. при подготовке деталей с различной номинальной толщиной стенки;
- обработку внутренних кольцевых поверхностей;
- наличие материала, форму подкладных колец и расплавляемых вставок;
- наличие заварки разъема подкладного кольца, качество шва заварки подкладного кольца, а также наличие зачистки шва заварки разъема подкладного кольца;
- чистоту (отсутствие визуально наблюдаемых загрязнений, пыли, продуктов коррозии, масла и т.п.), подлежащих сварке (наплавке) кромок и прилегающих к ним поверхностей, а также подлежащих неразрушающему контролю участков основного металла.

При сборке деталей под сварку визуально необходимо установить:

- правильность установки подкладных колец и расплавляемых вставок, установки временных технологических креплений, крепления деталей в сборочных приспособлениях;
- правильность расположения и количество прихваток и их качество;
- наличие защитного покрытия от брызг расплавленного металла на поверхности деталей;
- чистоту кромок и прилегающих к ним поверхностей деталей.

Измерительный контроль при подготовке деталей под сварку (рис. 81) осуществляется на соответствие:

- размеров разделки кромок (углов скоса кромок, толщины и ширины притупления кромок разделки); радиусы скругления разме-

ром до 1,0 мм в местах перехода поверхностей разделки, а также размера скоса внутренней кромки, выполняемый для улучшения условий выявления непровара в корне шва при радиографическом контроле;

- размеров (диаметра, длины, угла выхода резца) расточки (раздачи) концов труб по внутреннему диаметру;

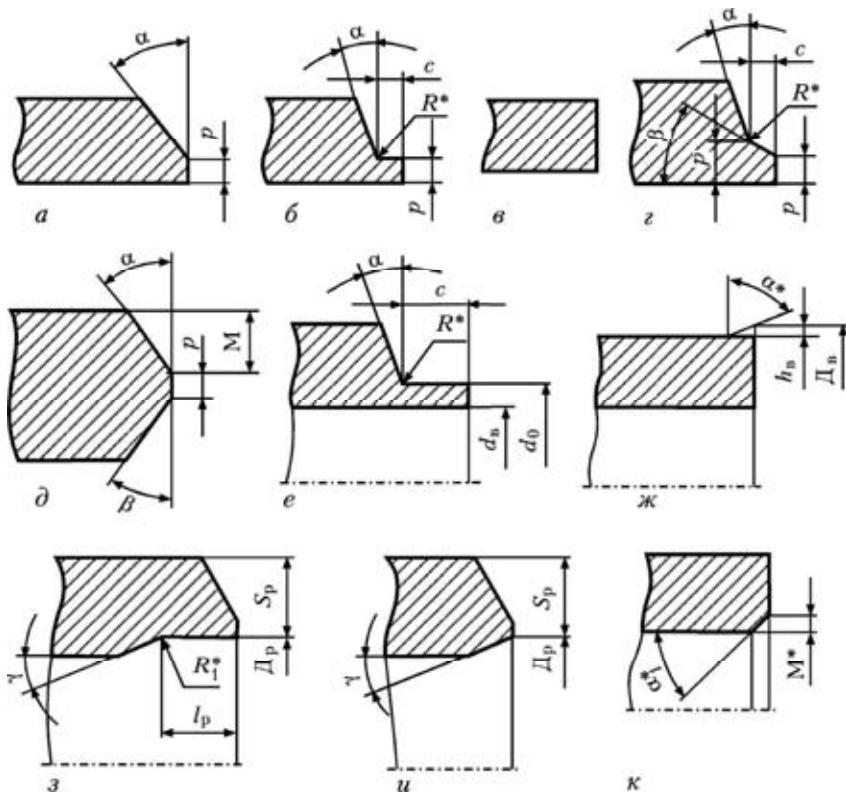
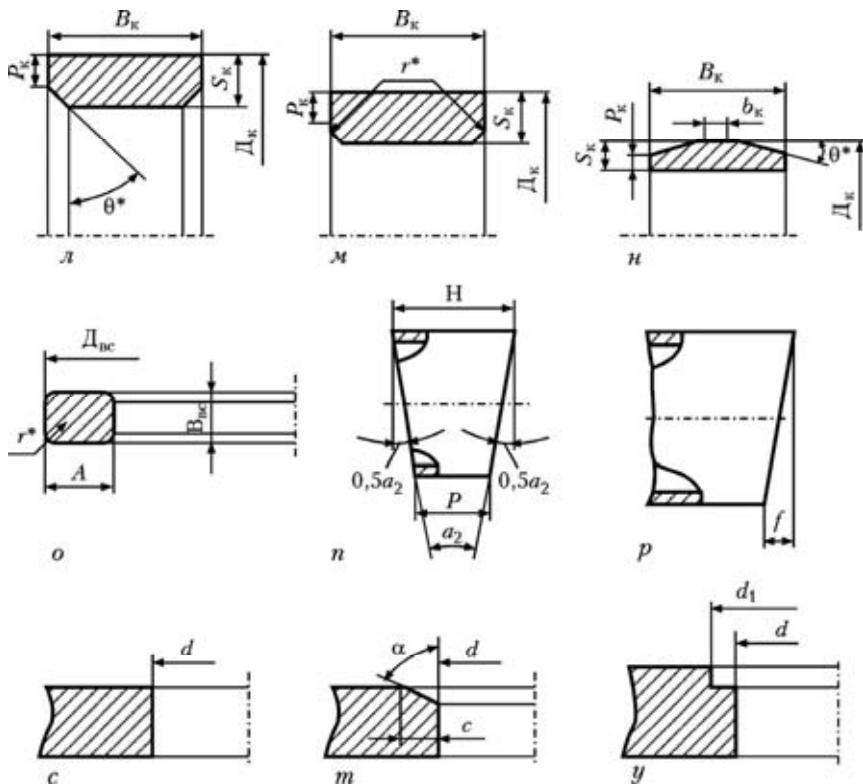


Рис. 81. Размеры, контролируемые при подготовке деталей под сварку:  
 а – V-образная разделка кромки; б – U-образная разделка кромки;  
 в – I-образная разделка кромки (без скоса кромки); г – V-образная двухскосная разделка кромки; д – V-образная двухсторонняя разделка кромки;  
 е – подготовка кромок штуцера Dу 10-65; ж – I-образная разделка с присадочным выступом; з – цилиндрическая расточка (раздача) концов труб по внутреннему диаметру; и – коническая расточка концов труб по внутреннему диаметру; к – притупление внутренней кромки трубы;

Продолжение рис. 81



*л, м, н* – подкладное стальное остающееся кольцо; *о* – расплавляемая проволочная вставка; *н* – сектор отвода; *р* – отклонение от перпендикулярности торца трубы; *с, м, у* – рассверловка отверстия под штуцер в корпусе (трубе, коллекторе)

\* Размеры измерению не подлежат – обеспечиваются режущим инструментом и оценивается визуально

- размеров подкладных колец и расплавляемых вставок (ширины, толщины, углов скоса, диаметра);
- размеров элементов секторных отводов;
- перпендикулярности торцов, подготовленных под сварку цилиндрических деталей, к ее образующей;
- минимальной фактической толщины стенки цилиндрической детали после расточки по внутреннему диаметру;

- размеров отверстий под штуцер (патрубок) и обработки кромок в трубе (коллекторе, корпусе);

ширины зоны зачистки механическим путем наружной и внутренней поверхностей деталей и шероховатости поверхностей кромок и прилегающих поверхностей деталей, в т.ч. мест зачистки шва разъема подкладного остающегося кольца.

Измерительный контроль соединения, собранного под сварку (рис. 82), включает проверку:

- размеров швов приварки временных технологических креплений, расстояния технологического крепления от кромки разделки и расположение креплений по длине (периметру) соединения (при необходимости, в случае если не оговорено расстояние между соседними креплениями);
- величины зазора в соединении, в т.ч. между деталью и подкладным кольцом;
- величины смещения кромок собранных деталей, размеров прихваток и их расположение по длине (периметру) соединения;

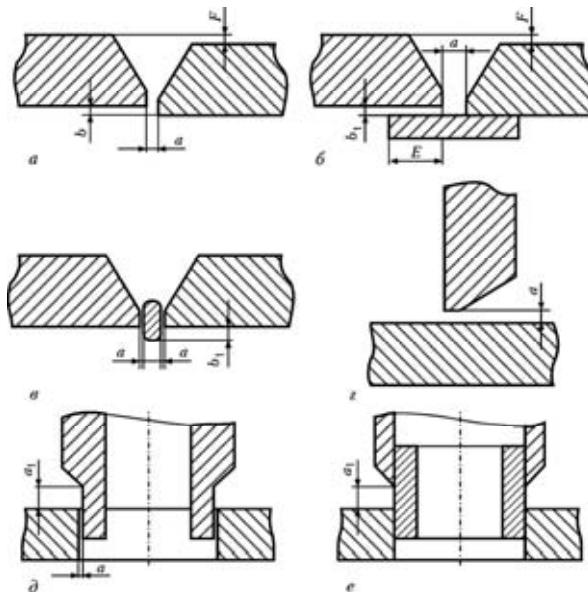
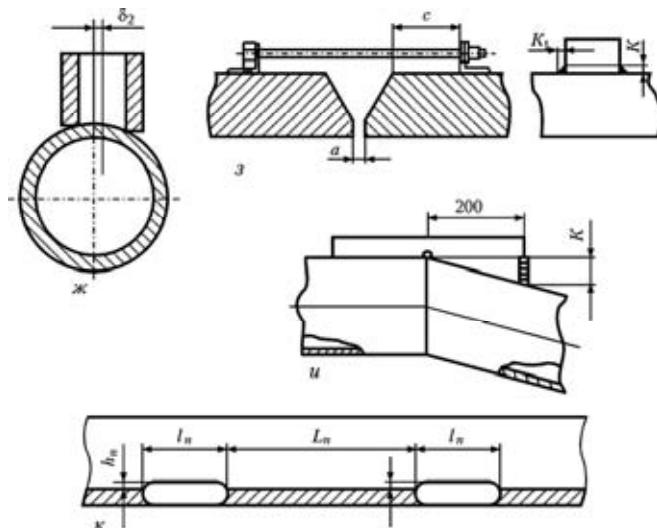


Рис. 82. Размеры, контролируемые при сборке соединения под сварку:  
 $a$  – стыковое соединение;  $b$  – стыковое соединение на подкладном кольце;  
 $c$  – стыковое соединение с расплавляемой вставкой;  $z$  – тавровое (угловое) соединение;  $d$ ,  $e$  – угловые соединения штуцеров;



*ж* – соединение с несимметричностью осей штуцера и корпуса;

*з* – соединение с приварными элементами временных креплений;

*и* – соединение с переломом осей цилиндрических деталей;

*к* – прихватки соединения

- величины зазора в замке расплавляемой проволочной вставки, перелома осей цилиндрических деталей трубы и плоскостей плоских деталей;
- несимметричности осей штуцера и отверстия в трубе, ширины зоны нанесения защитного покрытия на поверхностях деталей, геометрических размеров узла, собранного под сварку.

*Примечание.* Объем контроля для деталей и соединений I и II категорий по ПНАЭГ-7-010-89 должен составлять 100 %, а для деталей и соединений IIв и IIIа категорий по ПНАЭГ-7-010-89 – не менее 50 %.

При выявлении отклонений от требований рабочих чертежей объем выборочного контроля (20 %, 50 %) должен быть увеличен вдвое для группы однотипных деталей. Если при дополнительном контроле снова будут выявлены отклонения требований рабочих чертежей, то объем контроля для группы деталей, представленных к приемке, должен быть увеличен до 100 %.

**Таблица 31. Требования к измерениям деталей при подготовке их под сварку (рис. 81)**

Контролируемый параметр	Условное обозначение	Рисунок	Средства измерений. Требования к измерениям
1	2	3	4
1. Угол скоса кромки	$\alpha, \beta, \alpha_1$	$a, b, \varrho$	Угломер или шаблон универсальный. Измерение локальное
2. Притупление кромки	$p, p_1$	$a, b, \varrho, e$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения в двух взаимоперпендикулярных сечениях (4 точки)
3. Ширина «уса» разделки или скоса кромки	$c$	$b, e, m$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения в трех точках равномерно по длине (периметру)
4. Глубина скоса кромки	$M$	$\varrho, k, y$	Штангенциркуль ШЦ-1, линейка. Измерение не менее чем в трех точках по длине
5. Высота присадочного выступа	$h_a$	$жс$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения в двух взаимоперпендикулярных сечениях (4 точки)
6. Длина расточки (раздачи) труб по внутреннему диаметру	$I_p$	$з$	То же
7. Угол выхода резца (калибра)	$\gamma$	$и$	Шаблон универсальный или угломер. Измерение локальное
8. Диаметр расточки	$D_p$	$и$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения в двух взаимоперпендикулярных сечениях (4 точки)
9. Толщина стенки в месте расточки	$S_p$	$и$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения не менее чем в трех точках равномерно по длине
10. Ширина подкладного кольца	$B_k$	$л, м, н$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения не менее, чем в трех точках по длине (периметру)
11. Толщина подкладного кольца	$S_k$	$л, м, н$	То же

Продолжение табл. 31

1	2	3	4
12. Притупление подкладного кольца	$P_k$	$l, m, n$	— " —
13. Диаметр расплавляемого кольца (вставки)	$D_a, D_{bc}$	$l, m, n, o$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения в двух взаимоперпендикулярных сечениях (4 точки)
14. Высота расплавляемого кольца (вставки)	$A$	$o$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерения не менее чем в трех точках равномерно по периметру
15. Ширина расплавляемого кольца (вставки)	$B_{bc}$	$o$	То же
16. Длина сектора отвода (сварного) по наружной образующей	$H$	$n$	Линейка. Измерение детали в зоне максимального разме-ра
17. Длина сектора отвода (сварного) по внутренней об-разующей	$P$	$n$	Линейка. Измерение детали в зоне минимального разме-ра
18. Угол наклона кромки сектора отвода (сварного)	$\alpha_2$	$n$	Линейка и угломер или шаблон универсальный. Изме-рять скос кромки с обеих сторон ( $\alpha_2 = 0,5\alpha_2 + 0,5\alpha_2$ )
19. Отклонение торца разделки (трубы) от перпендикуляра к образующей трубы	$f$	$n$	Угольник и щуп. Измерения не менее чем в трех сечениях в зоне максимального сме-щения. Либо: отвес и линей-ка или щуп
20. Диаметр отверстия в корпусе (тру-бе)	$d$	$c, m, y$	Штангенциркуль ШЦ-1. Из-мерения в двух взаимоперпендикулярных сечениях (4 точки)
21. Диаметр расточки в корпусе (трубе)	$d_1$	$y$	То же
22. Шероховатость зачищенных по-верхностей	$d_1$	$y$	Профилограф-профило-метр, образцы шероховатости (сравнения)

Детали, забракованные при контроле, подлежат исправлению (доработке). Собранные под сварку соединения деталей, забракованные при контроле, подлежат расстыковке с последующей повторной сборкой после устранения причин, вызвавших их первоначальную некачественную сборку.

Требования к выполнению измерительного контроля при подготовке деталей под сварку приведены в табл. 31, а при сборке соединений под сварку – в табл. 32.

**Таблица 32. Требования к измерениям деталей при сборке их под сварку (рис. 82)**

Контролируемый параметр	Условное обозначение	Рисунок	Средства измерений. Требования к измерениям
1	2	3	4
1. Зазор в соединении	$a$	$\delta, \nu, \varrho, \delta, e$	Щуп, шаблон универсальный
2. Смещение кромок	$b$	$a$	Линейка и щуп
3. Смещение кромок деталей с наружной стороны соединения	$F$	$a, \delta$	Линейка и щуп
3. Смещение кромок деталей с наружной стороны соединения	$F$	$a, \delta$	Линейка и щуп
4. Зазор между подкладным кольцом и внутренней поверхностью детали	$b_1$	$\delta$	Шаблон специальный. Измерение не менее чем в трех точках по длине (периметру) соединения
5. Смещение проволочной вставки с внутренней стороны	$b_a$	$\delta$	Штангенциркуль ШЦ-1 шаблон универсальный или щуп. Измерение выполняется после прихватки вставки к кромке разделки одной из деталей
6. Зазор в замке расплавляемого кольца (вставки)	$a_1$	-	Шаблон универсальный или щуп. Измерение выполняется после прихватки вставки к одной из деталей
7. Несимметричность штуцера	$b_2$	$\varphi$	Контрольный стенд специальный

1	2	3	4
8. Расстояние приварного элемента крепления от кромки разделки	$C$	$z$	Линейка. Измерению подлежит каждый элемент крепления
9. Катет шва приварки элемента крепления	$K$	$z$	Линейка и щуп, штангенциркуль ШЦ-1, шаблон. Измерению подлежит каждый шов
10. Перелом осей цилиндрических элементов и угловое смещение поверхностей листов	$k$	$u$	Линейка ( $L = 400$ мм) и щуп
11. Длина прихватки	$l_p$	$\kappa$	Линейка или штангенциркуль ШЦ-1. Измерение каждой прихватки
12. Высота прихватки	$h_p$	$\kappa$	Штангенциркуль ШЦ-1. Измерение каждой прихватки
13. Расстояние между прихватками	$l_p$	$\kappa$	Линейка. Измерение расстояния между прихватками сединения выполняется в случаях, когда расстояние между прихватками регламентируется ПТД

При невозможности (отсутствие доступа) контроля смещения кромок с внутренней стороны соединения оценку возможного смещения следует проводить по смещению наружных кромок деталей (размер  $F$ ) либо смещению притупления «кусов» V-образной разделки (рис. 82,б, размер  $p$ ).

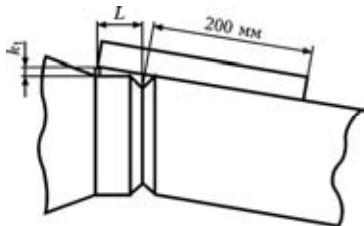


Рис. 83. Схема измерения перелома осей цилиндрических элементов

длины с последующим перерасчетом к длине 200 мм по формуле:

190

Перелом осей собранных под сварку кольцевых соединений цилиндрических элементов выполняется в 2...3 сечениях (в зоне максимального излома, выявленного при визуальном контроле) на расстоянии 200 мм от центра соединения. При отсутствии прямолинейного участка детали длиной 200 мм разрешается измерение размера проводить на участке меньшей

$$k = \frac{200 \times k_1}{L},$$

где  $k_1$  и  $L$  – размер перелома осей и расстояние от соединения (рис. 83).

Несимметричность штуцера в поперечном сечении определяется путем выполнения не менее двух измерений в одном сечении. Разрешается выполнять контроль несимметричности отверстия под штуцер на стадии контроля подготовки деталей под сварку.

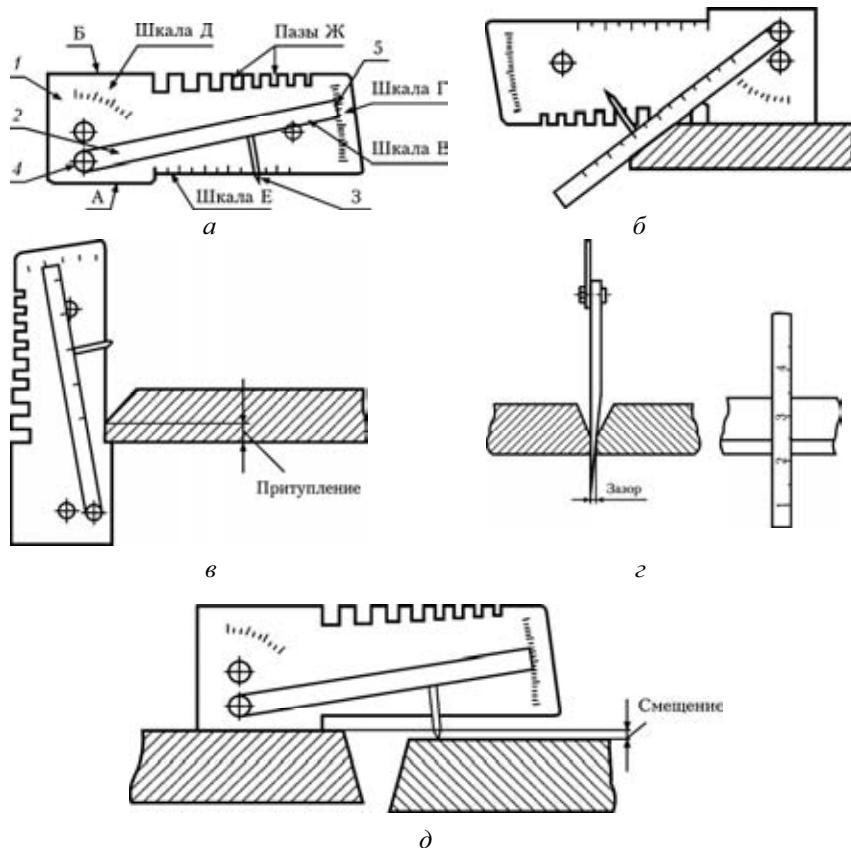


Рис. 84. Схемы измерения универсальным шаблоном сварщика УШС

Схемы измерения отдельных размеров подготовки деталей под сварку и сборки соединений под сварку с помощью шаблона универсального типа УШС приведены на рис. 84.

## **XVI. ПРОЦЕДУРЫ ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

### **1. Нормативная база**

Дефектоскопист, осуществляющий визуальный контроль, должен быть знаком с нормативными документами, относящимися к сварочному производству, со стандартами, определяющими качество изделий и со всеми стадиями технологического процесса использования сварных изделий. Для получения качественных сварных конструкций осуществляют систематический пооперационный контроль и контроль готовых сварных соединений.

Подлежат проверке квалификация сварщика и дефектоскописта; качество сварочных материалов, состояние сварочного оборудования, сборочно-сварочных приспособлений.

При операционном контроле проверяют:

- соответствие марки материала свариваемых элементов запроектированной марке стали стилоскопированием;
- качество подготовки и сборки заготовок под сварку;
- в процессе выполнения сварки – режим сварки, порядок наложения отдельных слоев, их форму, зачистку шлака между слоями, наличие надрывов, пор, трещин и других внешних дефектов в швах.

Готовые сварные соединения подвергают:

- внешнему осмотру и измерению;
- испытанию на твердость шва;
- ультразвуковому, радиографическому и другим методам неразрушающего контроля.

При входном визуальном контроле сварных труб с прямолинейным или спиральным швом обычно подлежит контролю не менее 10 % длины каждого шва.

Разделка кромок под сварку должна соответствовать способу и технологии сварки, толщине свариваемых элементов и положению швов в пространстве. Конструктивные элементы кромок должны

соответствовать требованиям ГОСТ 5264-89, ГОСТ 11533-92, ГОСТ 11534-92, ГОСТ 14771-89, ГОСТ 14776-90, ГОСТ 15164-90, ГОСТ 23518-79. Отклонения прямоугольности кромок от проектного очертания определяются допусками на зазоры, устанавливае-мыми ГОСТ 5264-89, ГОСТ 8713-91 и ГОСТ 14771-89.

Основными контролируемыми размерами при сборке являются:

- для стыковых швов – зазор между кромками, притупление, угол скоса кромок, смещение кромок с внутренней (наружной) стороны соединения;
- для нахлесточных соединений – ширина нахлестки и зазор между металлами;
- для тавровых соединений – угол и зазор между свариваемыми деталями, притупление и угол скоса кромок;
- для угловых соединений – зазор между свариваемыми деталями и угол между ними.

В результате завышения угла скоса кромок происходит переход элекротрдного материала; возрастают деформации и коробление свариваемых элементов вследствие большой зоны интенсивного разогрева и более заметного влияния усадки наплавленного металла из-за увеличения его объема. Уменьшенный угол скоса затрудняет надежное проплавление вершины угла разделки и приводит к непровару в корне шва. Увеличение размера притупления кромок приводит к непровару, а его уменьшение к прожогам. Уменьшение зазора обычно приводит к непровару, а чрезмерное увеличение – к прожогам.

При проверке качества прихваток следует обращать внимание на их чистоту и высоту. Загрязненные, с неудаленным шлаком, прихватки могут привести к шлаковым включениям в металле шва, а прихватки большой высоты – к непровары.

Все детали при сборке под сварку очищают в местах наложения швов по внешней и внутренней поверхности листов и труб на ширину не менее 20 мм.

## **2. Контроль качества сварочных материалов и процесса выполнения сварных швов**

В процессе производства визуальный контроль может быть использован для контроля электродов, флюса, защитных газов, сварочной и наплавочной проволоки, сварочного оборудования и при-

боров, процесса сварки и условий сварки.

Сводные данные о влиянии параметров режима сварки на размеры и форму шва приведены в табл. 33. По данным этой таблицы форма шва характеризуется коэффициентом формы шва, т.е. отношением ширины шва к его толщине и долей основного металла в металле шва, т.е. отношением площади расплавленного основного металла к площади сечения всего шва. Лучшей формой шва считается такая, у которой ширина шва в 1,3...2 раза больше толщины шва. При наложении многопроходной сварки первый слой обычно накладывается строго по осистыка, а последующие поочередно смещаются на свариваемые кромки во избежание непроваров кромок.

**Таблица 33. Влияние увеличения параметров режима сварки на качество шва**

Увеличение параметров	Глубина непроплавления	Ширина шва	Выпуклость шва	Коэффициент формы шва	Доля основного металла в шве
Сварочный ток	+	Не меняется	+	-	+
Диаметр электрода	-	+	-	+	-
Напряжение на дуге	Не меняется	+	-	+	+
Скорость сварки, м/ч: до 40 св. 40	+	-	+	-	+
Угол наклона электрода: вперед назад	- +	+ -	+ -	+ -	- +
Размер зерен флюса	-	+	-	+	-

Здесь приняты условные обозначения: «+» – увеличение; «-» – уменьшение.

Контроль наложения первого и очередных слоев сварного шва иногда выполняется с помощью сравнения с эталонами. Типичный эталон – это отрезок сварного шва, подобного изготавливаемому, демонстрирующий ряд последовательно навариваемых слоев. Каждый слой можно визуально сравнить с соответствующими слоями

эталона с учетом допусков на их изготовление.

Следует отметить, что качество выполнения первого слоя оказывает наибольшее влияние на прочность всего сварного соединения. Первый слой быстро застывает вследствие:

- соответствующей геометрии кромок стыка;
- большого объема основного металла по сравнению с объемом металла первого стыка.

Свариваемый стык может быть достаточно холодным, а дуга не достигать корня шва первого слоя, тогда возникают трещины, которые могут не только сохраниться, но и распространиться на следующие слои.

Визуальный контроль первого слоя шва должен быть полным, тщательно сравниваться с эталоном многослойного шва или внимательным осмотром. Внимательный контроль первого слоя многопроходного шва помогает распознавать расслоение свариваемых деталей, которое увеличивается под влиянием тепла, выделяемого при сварке. В процессе наложения первого слоя шва должен контролироваться зазор между свариваемыми кромками.

При выполнении односторонних однопроходных швов глубина проплавления при сварке первой стороны обычно составляет 50...60 % толщины металла. При сварке второй стороны должен быть хорошо проплавлен корень первого шва. Поэтому он предварительно должен быть тщательно очищен от шлака и окалины.

Степень коробления изделия в процессе сварки и после нее определяют с помощью линеек, индикаторов, прогибомеров и тензометров.

При контроле ответственных сварных изделий, где требуется большая точность изготовления их геометрической формы, используют многокоординатные измерительные приборы. Эти приборы предлагаются во многих модификациях, отличающихся по разным показателям, начиная от внешнего исполнения (консольный, колонный, порталный, мостовой), размеров, точности и кончая отделкой и степенью автоматизации, а также производительностью. Современные управляемые ЭВМ многокоординатные приборы позволяют определять в кратчайшее время отклонения от нормы размеров, формы и положения элементов очень сложных изделий.

Качество сварного соединения в значительной мере характеризуется размерами сварных швов. Недостаточное сечение шва уменьшает его прочность, завышенное – увеличивает внутренние напряжения и деформации в нем.

Для проверки размеров сечения у стыковых швов замеряют их ширину и выпуклость (рис. 85,*a*, *b*), вогнутость (рис. 85,*б*), глубину подреза (рис. 85,*г*), чешуйчатость (рис. 85,*д*); в угловых швах, соединениях внахлестку и в тавр – катет шва (рис. 85,*ж*).

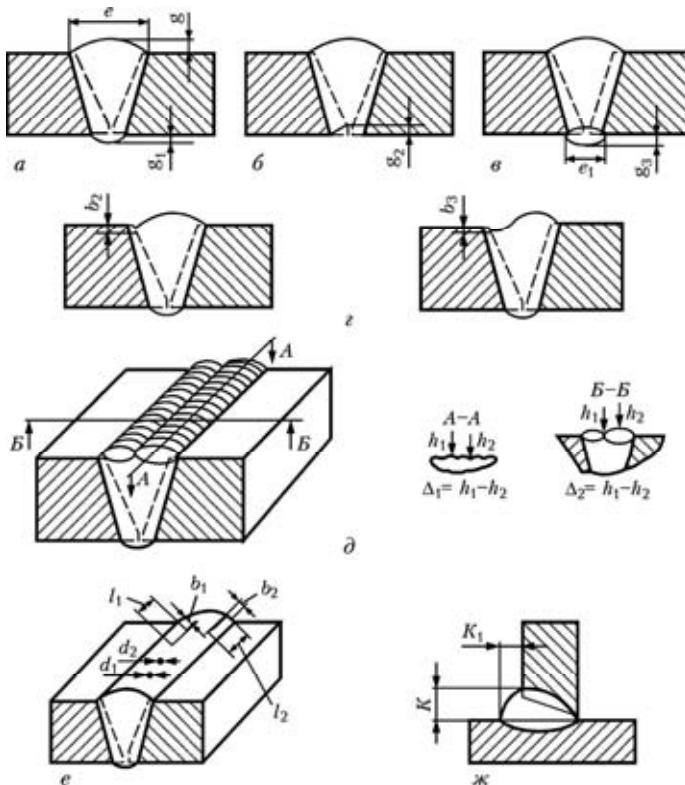


Рис. 85. Размеры сварного шва, подлежащие измерительному контролю:  
 $a$  – ширина ( $e$ ), выпуклость ( $g, g_1$ );  $\delta$  – вогнутость корня сварного шва ( $g_2$ );  
 $\vartheta$  – ширина лицевой стороны двухстороннего сварного шва ( $e_1$ ), выпук-  
лость ( $g_3$ );  $\varepsilon$  – подрез зоны сплавления ( $b_2$ ) и неполное заполнение раздел-  
ки кромок ( $b_3$ );  $\delta$  – чешуйчатость ( $\Delta_1$ ) и западание между валиками шва  
( $\Delta_2$ );  $e$  – размеры поверхностных дефектов;  $\kappa$  – катет шва ( $K, K_1$ )

На рис. 86 показаны изображения выпуклости (вогнутости) и толщины углового шва.

Значения указанных выше величин, а также допускаемые отклонения устанавливаются Правилами устройства и безопасной эксплуатации, стандартами (например, ГОСТ 5264-89, ГОСТ 14771-89,

ТУ, СНиП, НТД, ПТД) и рабочими чертежами изделий.

Размеры сварного шва контролируют измерительным инструментом обычно с точностью измерения  $\pm 0,1$  мм или специальными шаблонами, имеющими вырезы под определенный шов, размер которого указан (выбит) на шаблоне.

Кроме того, есть предельные шаблоны с наибольшими (проходными) и наименьшими (непроходными) контрольными вырезами. Количество таких шаблонов должно соответствовать номенклатуре сварных швов и типов сварных соединений.

Удобно применять универсальные шаблоны, пригодные как для обмера швов, так и для проверки правильности подготовки кромок под сварку. Требования к общему виду (профилю) сварного шва неоднозначны и должны быть определены в НТД.

По внешнему виду шва можно установить причины отклонения от нормы. Так, при малом токе шов получается слишком высоким, с закругленными краями и неглубоким проваром; завышенный ток ведет к неровностям краев шва и появлению подрезов. При сварке длинной дугой происходит интенсивное разбрызгивание металла и шов неодинаков по ширине. Неравномерная чешуйчатость, ширина и высота шва указывают на нарушение режима сварки и частые обрывы дуги.

В табл. 34 приводятся международные нормы на допустимые дефекты стальных сварных соединений, выполненных дуговой сваркой, приведены выдержки из «Руководства по определению уровней качества указанных соединений в зависимости от дефектов шва» (ИСО 5817-92). Международный стандарт ИСО 5817-92 разработан Техническим комитетом ИСО/TK44 «Сварка и относящиеся к ней процессы», Подкомитетом ПК10 «Унификация требований к свар-

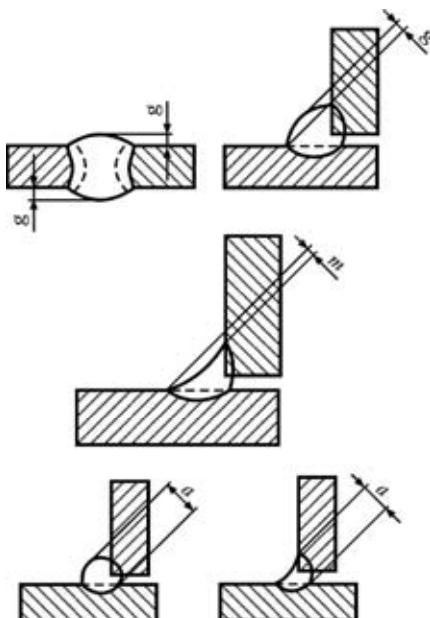


Рис. 86. Выпуклости (g), вогнутости (m) и толщины (a) углового шва

ным соединениям металлов» и предназначен для использования в качестве справочного материала при проведении работ, требующих стандартизации. Три уровня качества, обозначенные *D* – низкий, *C* – средний и *B* – высокий, определяемые этим стандартом, предназначены только для выработки базовых справочных данных и не связаны с какими-либо конкретными приложениями. Хотя эти уровни потенциально могут описать большую часть практических приложений, они относятся только к типам сварных соединений, а не к за- конченным изделиям или компонентам. Следовательно, возможно применение различных уровней качества к отдельным сварным соединениям в одном и том же изделии или компоненте. Хотя рассматриваемый Международный стандарт относится к сварке материалов в диапазоне толщин 3...63 мм, он может быть легко применен и к более толстым сварным соединениям при условии учета технических факторов, влияющих на качество сварных соединений.

**Таблица 34. Оценка уровней качества сварных швов согласно ИСО 5817-92**

Наимено- вание де- фектов	Характеристика де- фектов	Дефекты и их параметры для раз- личных уровней качества		
		<i>D</i>	<i>C</i>	<i>B</i>
1	2	3	4	5
Трешины	Все типы трещин за исключением микротрещин ( $h \times 1 < 1 \text{ мм}^2$ ) и кратерных трещин	Не допускаются		
Кратерные трещины		Допус- каются	Не допускаются	
Пористость и газовые поры	Относительная суммарная площадь в сечении сварного соединений (ширина проплавления или его глубина, умноженная на длину шва) Максимальный размер наибольшей поры шва: для стыкового для углового Максимальный размер одиночной поры	4 % $d \leq 0,5s$ $0,5a$	2 % $d \leq 0,4s$ $0,4a$	1 % $d \leq 0,3s$ $0,3a$ 5 мм 4 мм 3 мм

Продолжение табл. 34

1	2	3	4	5
Локализованная (групповая) пористость	Суммарная площадь пор в группе суммируется и вычисляется в процентах по наибольшей из двух площадей: поверхности, окружающей все поры, или круга с диаметром, соответствующим ширине сварного шва  Максимальное значение относительной суммарной площади в сечении сварного соединения (ширина проплавления или его глубина, умноженная на длину шва)		16 %	8 %
Локализованная (групповая) пористость	Максимальный размер наибольшей поры шва: для стыкового для углового Максимальный размер локализованной групповой поверхности	$d \leq 0,5s$ $0,5a$	$d \leq 0,4s$ $0,4a$	$d \leq 0,3s$ $0,3a$
Удлиненные полости, газовые раковины	Длинные дефекты шва: для стыкового для углового В любом случае максимальный размер	$h \leq 0,5s$ $0,5a$	Не допускаются	Не допускаются
	Короткие дефекты шва: для стыкового для углового В любом случае максимальный размер	$h \leq 0,5s$ $0,5a$ 4 мм или не больше, чем толщина сварного шва	$h \leq 0,4s$ $0,4a$ 3 мм или не больше, чем толщина сварного шва	$h \leq 0,3s$ $0,3a$ 2 мм или не больше, чем толщина сварного шва

Продолжение табл. 34

1	2	3	4	5
Твердые включения (отличные от медных)	Длинные дефекты шва: для стыкового для углового В любом случае максимальный размер	$h \leq 0,5s$ $h \leq 0,5a$ 2 мм	Не допускаются	Не допускаются
	Короткие дефекты шва: для стыкового для углового В любом случае максимальный размер	$h \leq 0,5s$ 0,5a 4 мм или не больше, чем толщина сварного шва	$h \leq 0,4s$ 0,4a 3 мм или не больше, чем толщина сварного шва	$h \leq 0,3s$ 0,3a 2 мм или не больше, чем толщина сварного шва
Медные включения			Не допускаются	
Несплавления		Допускаются прерывистые и без разрушения поверхности	Не допускаются	
Отсутствие проплавления (неполное проплавление)		$h \leq 0,2s$ максимально 2 мм	Длинные дефекты не допускаются	Не допускаются
			Короткие дефекты $h \leq 0,1s$ максимально 1,5 мм	
Неправильная сборка заготовок под сварку	Чрезмерный или недостаточный зазор между соединяемыми деталями Зазоры, превышающие установленные размеры, в некоторых случаях могут быть компенсированы соответствующим увеличением размера шва	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,3a$ максимально 4 мм	$h \leq 0,5 \text{ мм} + 0,2a$ максимально 3 мм	$h \leq 0,5 \text{ мм} + 0,1a$ максимально 2 мм
Подрез	Необходим плавный переход канавки к основному металлу и шву	$h \leq 1,5 \text{ мм}$	$h \leq 1,0 \text{ мм}$	$h \leq 0,5 \text{ мм}$

Продолжение табл. 34

1	2	3	4	5	
Чрезмер-ная вы-пуклость шва	Необходим плавный переход выпуклости шва к основному металлу	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,25b$ макси- мально 10 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,15b$ макси- мально 7 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,1b$ макси- мально 5 мм	
		$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,25b$ макси- мально 5 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,25b$ макси- мально 4 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,25b$ макси- мально 3 мм	
Угловой шов, имеющий большую высоту рабочего сечения	Для многих применений излишняя высота рабочего сечения шва не является причиной отбраковки	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,3a$ макси- мально 5 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,2a$ макси- мально 4 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,15a$ макси- мально 3 мм	
Угловой шов, имеющий недостаточную высоту рабочего сечения	Угловой шов, имеющий недостаточную высоту рабочего сечения, не следует рассматривать как дефектный, если она скомпенсирована глубиной проплавления	Длинные дефекты на допускаются		Не до- пускается	
		Короткие дефекты $h \leq 0,3 \text{ мм}$ $+0,1a$			
		макси- мально 2 мм	макси- мально 1 мм		
Чрезмер-ный про-вар корня шва		$h \leq 1 \text{ мм}$ $+1,2b$ макси- мально 5 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,6b$ макси- мально 4 мм	$h \leq 1 \text{ мм}$ $+0,3b$ макси- мально 3 мм	
Локальный выступ		Допуска- ется	Случайные локальные выступы допускаются		
Смеще- ние кро- мок	Обычно правильному положению кромок соответствует совпадение центров свариваемых деталей	Продольные швы			
		$h \leq 0,25t$ макси- мально 5 мм	$h \leq 0,15t$ макси- мально 4 мм	$h \leq 0,1t$ макси- мально 3 мм	
		Кольцевые швы $h \leq 0,5t$			
		макси- мально 4 мм	макси- мально 3 мм	макси- мально 2 мм	

Продолжение табл. 34

1	2	3	4	5		
Непол-номер-ный шов	Необходим гладкий переход от шва к основному металлу	Длинные дефекты не допускаются				
		Короткие дефекты				
		$h \leq 0,5t$ макси- мально 2 мм	$h \leq 0,1t$ макси- мально 1 мм	$h \leq 0,05t$ макси- мально 0,5 мм		
Асим-метрич-ный шов	Асимметрия не пре- дусмотрена	$h \leq 2$ мм $+0,2a$	$h \leq 2$ мм $+0,15a$	$h \leq 1$ мм $+0,15a$		
Вогну- тость корня шва. Коробле- ние корня шва	Необходим плавный переход канавок в сварное соединений	$h \leq 1,5$ мм	$h \leq 1$ мм	$h \leq 0,5$ мм		
Наплыв, натек		Короткие дефекты допуска- ются	Не допускаются			
Плохое возоб- новление шва		допуска- ется	Не допускается			
Следы дуги		На возможность приемки влияет последующая обработка и свойства основного материала, в частности, чувствительность к трещино-образованию				
Брызги		На возможность приемки влияет характер эксплуатации				
Множе- ственные дефекты в одном сечении	При $s \leq 10$ мм или $a \leq 10$ мм, или меньше не- обходима специальная оценка качества $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_s = \sum h$ $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_s + h_b = \sum h$	Максимальная суммарная высота коротких дефектов				
		$0,25 s$ или $0,25 a$ макси- мально 10 мм	$0,2 s$ или $0,25 a$ макси- мально 10 мм	$0,15 s$ или $0,15 a$ макси- мально 10 мм		

Здесь:  $a$  – высота рабочего сечения углового сварного шва;  $b$  –

ширина выпуклости сварного шва (ширина проплавления);  $d$  – диаметр поры;  $h$  – размер (высота или ширина) дефекта;  $l$  – длина дефекта;  $s$  – номинальная ширина стыкового сварного шва или глубина проплавления (в случае частичного проплавления);  $t$  – толщина стенки свариваемых деталей;  $z$  – калибр углового шва, т.е. катет прямоугольного треугольника, представляющего рабочее сечение шва; если сечение в виде равнобедренного прямоугольного треугольника,  $z = a\sqrt{2}$ .

Ниже приводится ряд определений, принятых в ИСО 5817-92 и ИСО 2553-84.

*Высота рабочего сечения углового сварного шва* – высота наибольшего равнобедренного треугольника, который можно вписать в сечение сварного шва.

*Глубина проплавления* – это минимальное расстояние от поверхности детали до нижней границы проплавления, которое не может быть меньше наиболее тонкой детали.

*Короткие дефекты* – это один или более дефектов с общей длиной не более чем 25 мм на каждые 100 мм длины сварного шва или максимум 25 % от длины шва при его длине менее 100 мм.

*Длинные дефекты* – это один или более дефектов с общей длиной более 25 мм на каждые 100 мм длины сварного шва или минимум 25 % от длины шва при его длине менее чем 100 мм.

*Площадь ширины проплавления* – площадь, равная произведению длины шва и максимальной толщины шва.

*Площадь глубины проплавления* – площадь, равная произведению длины шва и глубины проплавления.

### **3. Порядок выполнения визуального и измерительного контроля сварных соединений**

Послойный контроль выполняется в случаях, оговоренных в рабочих чертежах и при требовании Заказчика.

Визуальный послойный контроль в процессе сварки выполняется с целью подтверждения отсутствия трещин, включений, прожогов, свищей, усадочных раковин, несплавлений грубой чешуйчатости, западаний между валиками, наплыдов в каждом слое шва.

Выявленные при контроле дефекты подлежат исправлению перед началом сварки последующего слоя.

Измерениями необходимо фиксировать:

- размеры поверхностных дефектов, выявленных при визуальном контроле;
- высоту и ширину шва, а также вогнутость и выпуклость обратной стороны шва в случае доступности обратной стороны шва для контроля;
- высоту (глубину) углублений между валиками (западания межваликовые) и чешуйчатости поверхности шва;
- подрезы основного металла;
- несплавления и непровары с наружной и внутренней стороны шва.

Высота и ширина сварного шва должна определяться не реже, чем через один метр по длине соединения, но не менее, чем в трех сечениях равномерно расположенных по длине шва.

При контроле стыковых сварных соединений труб наружным диаметром до 89 мм включительно с числом однотипных соединений более 50 на одном изделии допускается определение размеров шва выполнять на 10...20 % соединений в одном – двух сечениях, при условии, что при визуальном контроле, которому подвергают все соединения, нет сомнений в части размеров (ширины, высоты) и качества шва.

При измерительном контроле наплавленного антикоррозионного покрытия замеры его толщины на цилиндрических поверхностях проводить не реже, чем через 0,5 м, в осевом направлении и через каждые 60<sup>0</sup> по окружности при ручной наплавке и 90<sup>0</sup> при автоматической наплавке.

На плоских сферических поверхностях проводят не менее одного замера на каждом участке размером 0,5 × 0,5 м при автоматической наплавке.

Измерение глубины западаний между валиками при условии, что высоты валиков отличаются, должно выполняться относительно валика, имеющего меньшую высоту. Аналогично определять и глубину чешуйчатости валика (по меньшей высоте двух соседних чешуек).

Измерение размеров выполняют в первую очередь на участках шва, вызывающего сомнение, например с использованием табл. 35.

Выпуклость (вогнутость) стыкового шва оценивается по максимальной высоте (глубине) расположения поверхности шва от уровня расположения наружной поверхности деталей. В том случае, когда уровни поверхности деталей одного типоразмера (диаметр, толщина) отличаются, измерения следует проводить относи-

тельно уровня поверхности детали, расположенной выше уровня поверхности другой детали.

**Таблица 35. Характеристики измерительных шаблонов по стандарту EN 970:1997**

Описание шаблонов сварного шва	Диапазон измерений, мм	Точность отсчета, мм	Угол между свариваемыми элементами, град.	Допустимое отклонение угла между свариваемыми элементами
1	2	3	4	5
Шаблон для угловых швов от 3 до 15 мм толщиной для криволинейных участков	3...15	≈0,5	90	Небольшое
Набор шаблонов для сварных швов толщиной от 3 до 15 мм; толщиной от 3 до 7 мм с шагом 0,5 мм	3...12	Зависит от набора	90	Не предусмотрено
Шаблон с нониусом для измерения катетов угловых швов, превышения выпуклости шва, углы разделки V- и Y-образных швов в 60, 70, 80 и 90°	0...20	0,1	90	Не предусмотрено
Шаблон для измерения семи параметров углового шва при угле 90° между его элементами	0...20	0,2	90	Не предусмотрено
Измеритель зазора в соединении	0...6	0,1	-	-
Крючковый штангенциркуль для измерения смещения наружных кромок	0...100	0,06	-	-

*Продолжение табл. 35*

1	2	3	4	5
Универсальный шаблон для измерения: 1 – угла скоса; 2 – зазора в соединении; 3 – притупления кромок, ширины сварного шва; 4 – смещения наружных кромок, выпуклости шва; 5 – диаметра электродов	0...30	0,1	-	± 25 %

В том случае, когда выполняется сварка деталей с различной толщиной стенки и уровень поверхности одной детали превышает уровень поверхности второй детали, оценку выпуклости (вогнутости) поверхности шва выполнить относительно линии, соединяющей края поверхности шва в одном сечении с помощью специального шаблона.

Измерения чешуйчатости и западаний между валиками шва, глубины и высоты углублений (выпуклостей) в сварном шве и основном металле, в т.ч. при техническом диагностировании, определяют по слепку, снятому с контролируемого участка. Материалом для слепка могут служить пластилин, воск, гипс и другие материалы. Измерения проводят с помощью измерительной лупы или на микроскопе после разрезки слепка механическим путем.

#### **4. Порядок выполнения контроля сварных конструкций в целом**

*При визуальном контроле сварных узлов и деталей предусматривается проверка:*

- отклонений по взаимному расположению элементов сварного узла;
- наличия маркировки сварных соединений;
- наличия маркировки узла (детали);
- отсутствия поверхностных повреждений материала, вызванных

отклонениями в технологии изготовления, транспортировкой и условиями хранения;

- наличия окраски поверхностей; отсутствия неудаленных приварных элементов (технологические крепления, гребенки, бобышки).

*При измерительном контроле гнутых колен труб предусматривается проверка:*

- отклонения от круглой формы (овальность) в любом сечении гнутых труб (колен);
- толщины стенки в растянутой части гнутого участка трубы (колена);
- радиуса гнутого участка трубы (колена);
- высоты волнистости (гофры) на внутреннем обводе гнутой трубы (колена);
- неровностей (плавных) на внешнем обводе (в случаях, установленных НТД);
- предельные отклонения габаритных размеров.

*При измерительном контроле тройников и коллекторов с вытянутой горловиной предусматривается проверка:*

- эксцентричности оси горловины относительно оси корпуса;
- радиусов перехода наружной и внутренней поверхностей горловины к корпусу;
- размеров местных углублений от инструмента на внутренней поверхности тройника, вызванных применяемым инструментом;
- уменьшения диаметра корпуса вследствие утяжки металла при высадке (вытяжке) горловины;
- угла конуса на наружной поверхности патрубка;
- местного утолщения стенки горловины, овальности прямых участков корпуса тройника по наружному диаметру в месте разъема штампа.

*При измерительном контроле переходов, изготовленных методами подкатки (последовательного обжима), осадки в торец и вальцовкой листовой стали с последующей сваркой предусматривается проверка:*

- размеров углублений и рисок на внутренней поверхности обожженного конца, носящих характер ужимин;
- утолщения стенки на конической части перехода;
- формы и размеров шва, отсутствия недопустимых поверхностных дефектов.

*Измерительный контроль сварных изделий (деталей) – тройники*

*ков, фланцевых соединений, секторов отводов, коллекторов, трубных блоков и т.д., предусматривает проверку:*

- размеров перекосов осей цилиндрических элементов;
- прямолинейности образующей изделия;
- отклонения штуцера (привариваемой трубы, патрубка) от перпендикулярности относительно корпуса (трубы, листа), в которых вваривается штуцер (труба, патрубок);
- отклонения осей концевых участков свариваемых секторных отводов;
- кривизны (прогиба) корпуса (трубы) сварных угловых соединений труб (варка трубы, штуцера);
- отклонения размеров, определяющих расположение штуцеров в блоках, отклонения оси прямых блоков от проектного положения;
- отклонения габаритных размеров сварных деталей и блоков.

Контроль геометрических размеров колен и труб гнутых, а также прямых трубных деталей и блоков, должен проводиться методом плазирования (наложением на плаз с контрольным чертежом) с последующим измерением отклонений измерительным инструментами (линейкой, шупом, штангенциркулем, шаблоном, оптическими приборами и др.). Замеры отклонений гнутых труб (колен) проводятся относительно наружной поверхности.

Овальность любого сечения колена (гнутой трубы) и прямых участков корпуса тройника по наружному диаметру в зоне разъема штампа определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{(D_{\max}^{\max} - D_{\min}^{\min})}{D_{\max}^{\max} + D_{\min}^{\min}} \times 100,$$

где  $D_{\max}^{\max}$  и  $D_{\min}^{\min}$  – максимальное и минимальное значения наружного диаметра. Измерение  $D_{\max}^{\max}$  и  $D_{\min}^{\min}$  выполнять в поперечном сечении детали, имеющей наибольшие отклонения.

Перелом осей трубных деталей и прямолинейность образующей определяется в 2...3 сечениях в зоне максимального перелома, выявленного при визуальном контроле.

Отклонения от перпендикулярности наружной поверхности штуцера к корпусу (труbe) определяются в двух взаимоперпендикулярных сечениях. Измерения в первую очередь следует выполнять на участках, вызывающих сомнение в части размеров по результатам визуального контроля.

## **5. Порядок выполнения контроля после исправления дефектных мест**

*При ремонте дефектных участков необходимо контролировать:*

- полноту удаления выявленного дефекта;
- формы выборки дефектного участка; обработки кромок выборки; отсутствие загрязнений, пыли, продуктов коррозии, масла и т.п. на поверхности выборки и прилегающих к ней поверхностей;
- ширину зоны зачистки механическим путем поверхностей основного материала, прилегающих к кромкам выборки.

*При визуальном контроле состояния основного материала и сварных соединений трубопроводов проверяют:*

- формоизменения изделий (деформированные участки, коробление, провисание, выход трубы из ряда и других отклонений от первоначального расположения);
- отсутствие трещин, коррозионных язв и других поверхностных дефектов, образовавшихся в процессе эксплуатации;
- отсутствие эрозионного износа поверхностей; отсутствие наружного износа поверхностей нагрева;
- размеры деформированных участков основного материала, в т.ч. длину, ширину и глубину вмятин, выпучин, отдулин;
- овальность цилиндрических элементов, в т.ч. гибов труб;
- прямолинейность образующей изделия;
- фактическую толщину стенки основного материала;
- глубину коррозионных язв и размеры зон коррозионного повреждения, включая их глубину.

Контролируемая зона сварного соединения должна включать весь объем металла шва, а также примыкающие к нему участки основного металла в обе стороны от шва шириной:

- не менее 5 мм – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой при номинальной толщине сваренных деталей 5 мм включительно;

- не менее номинальной толщины стенки детали – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой при номинальной толщине сваренных деталей свыше 5 до 20 мм;

- не менее 20 мм – для стыковых соединений, выполненных дуговой и электронно-лучевой сваркой при номинальной толщине сваренных деталей свыше 20 мм;

- не менее 5 мм (независимо от номинальной толщины сваренных деталей) – для угловых, тавровых, торцевых и нахлесточных сварных соединений;

- не менее 50 мм (независимо от номинальной толщины сваренных деталей) – для сварных соединений, выполненных электрошлаковой сваркой.

Разрешение на выполнение каждого последующего вида работ (технологической операции) выдается лицом, выполняющим визуальный и измерительный контроль, который делает отметку о приемке предыдущего вида работ в учетных документах либо путем клеймения на поверхности изделия.

*Для измерения размеров изделий и сварных соединений, угловых сборочных единиц, а также поверхностных дефектов следует применять приборы, прошедшие метрологическую поверку:*

- лупы измерительные по ГОСТ 25706;
- линейки измерительные металлические по ГОСТ 427;
- угольники поверочные 90<sup>0</sup> лекальные по ГОСТ 164;
- щупы №№ 2...4;
- угломеры с нониусом по ГОСТ 5378;
- стенкомеры и толщиномеры индикаторные по ГОСТ 11358;
- микрометры по ГОСТ 6507;
- нутромеры метрические по ГОСТ 10 и индикаторные по ГОСТ 858;
- шаблоны, в т.ч. универсальные (например, типа УШС по ТУ 102.338-83), радиусные, резьбовые и др.;
- толщиномеры ультразвуковые, например, УТ-93П и др.

*Для измерения больших линейных размеров изделий или отклонений от формы и расположения поверхностей изделий следует применять:*

- поверочные плиты;
- плоскопараллельные концевые меры длины по ГОСТ 9038 с набором специальных принадлежностей по ГОСТ 4119;
- штриховые меры длины по ГОСТ 427 и ГОСТ 7502 (стальные измерительные линейки, рулетки);
- оптические и лазерные приборы (нивелиры, макротелескопы), а также другие измерительные приборы и инструменты, приведенные в табл. 36, 37.

**Таблица 36. Технические характеристики приборов, применяемых для измерительного контроля**

Тип прибора	Марка	ГОСТ, ТУ	Диапазон измерений, мм	Цена деления, мм	Погрешность измерений, мм
1	2	3	4	5	6
Профилографо-филометр	Мод. 280	ТУ2. 03423-88 ГОСТ 19300			
Угломер с нониусом	УТ мод. 127 2УМ 5УМ 4УМ	ГОСТ 5378	0...180 град.	2 мин 2 мин 5 мин 15 мин	± 2 мин ± 2 мин ± 3 мин ±15 мин
Стенкомер индикаторный	C-2 C-10А C-10Б C-25 C-50	ГОСТ 11358	0...2 0...10 0...10 0...25 25...50	0,01 0,01 0,1 0,1 0,1	±0,015 ±0,020 ±0,1 ±0,1 ±0,1
Толщиномер	TP10-60 TP25-60 TP50-250	ГОСТ 11358	0...10 0...25 0...50	0,01 0,01 0,1	±0,018 ±0,03 ±0,15
Микрометр	МК50-1 МК75-1 МК100-1 МК125-1 МК150-1 МК175-1 МК200-1	ГОСТ 6507	25...50 50...75 75...100 100...125 125...150 150...175 175...200	0,01	±0,02 ±0,0025 ±0,0025 ±0,003
Нутромер	HM-75 HM-600 HM-1250	ГОСТ 10	50...75 75...600 160...1250		±0,003 ±0,003 ±0,004
Нутромер	НИ-6-10-2 НИ-10-18-2 НИ-18-50А-2	ГОСТ 868	6...10 10...18 18...50	0,01 0,01 0,01	±0,012 ±0,012 ±0,015
Штангенциркуль	ШЦ-1-125-0,1	ГОСТ 166	0...125	1	±0,1

*Продолжение табл. 36*

1	2	3	4	5	6
Штан- генцир- куль ШЦ-П	ШЦ-П-160 ШЦ-П-200-0,1	ГОСТ 166	0...160 0...200 0...250	1 1 1	±0,07 ±0,08 ±0,1
Щуп	№ 1 № 2 № 3 № 4		0,02...0,1 0,02...0,5 0,055...1,0 0,1...1,0		
Набор радиусных шаблонов	РШ-1 РШ-2 РШ-3		0-25		
Набор резьбовых шаблонов	M 60 <sup>0</sup> M 55 <sup>0</sup>		Шаг резьбы 0,4-6,0 мм. Число ниток на 1 дюйм 28...4		
Линейки	Линейки 150 - 1000	ГОСТ 427	0...1000	1	±0,1...0,2
Метр складной		ТУ2-17-303-81	0...1000	1	±1
Рулетка	ЗПК3 1АНТ/1 ЗПК3-2АНТ/1	ГОСТ 7502	0...1000 0...2000	1 1	±0,20 ±0,2
Угольник поверочный 90 <sup>0</sup>	УЛП-1-60 УЛП-1-160	ГОСТ 3749			
Меры длины	2-Н7	ГОСТ 9038	1...200		±0,01
Меры угловые	Наборы №№ 2 – 8	ГОСТ 2875	1 <sup>0</sup> ...70 <sup>0</sup>		
Лупа	ЛАЗ-6 <sup>x</sup>	ГОСТ 25706	Увеличение 6 крат		
Лупа измерительная	ЛИ-4-10 <sup>x</sup>	ГОСТ 25706	Увеличение 10 крат		
Лупа бинокулярная	ВЛ-2	ТУ3-3.687	Увеличение 2 крат		

**Таблица 37. Приборы и средства измерений прямолинейности и плоскости**

Наименование средств для измерения	Тип	Длины измеряемых поверхностей, мм
1	2	3
Интерферометр	ИЗК-1	свыше 400 до 6300
Автоколлиматор	АК-1У АК-6У	свыше 400 до 10000 то же
Оптические линейки	ИС-36 ИС-43 ИС-49	до 4000 то же — " —
Индуктивные линейки	ЛИП-3 УИП-5	до 1000 то же
Уровни (рамные, брусковые, индуктивные)		свыше 400 до 10000
Линейки прямоугольного и двутаврового сечения, мостики	ШП, ШД, ШМ	свыше 400 до 4000
Оптические струны	ДП-477М	свыше 400 до 10000
Визирные трубы	ППС-11 ППС-12	свыше 400 до 10000 то же
Уровни гидростатические	115-І 115-ІІ	

Число одиночных включений, выявляемых при визуальном контроле, не должно превышать значений, указанных в НТД, на любом участке сварного соединения длиной 100 мм. Для сварных соединений протяженностью менее 100 мм нормы по числу одиночных включений уменьшают пропорционально уменьшению протяженности контролируемого соединения. Полученная при этом дробная величина округляется до ближайшего целого числа.

Результаты визуального, измерительного контроля и отчетной (акты, заключения, протоколы) документации, оформляются в соответствии с требованиями ГОСТ 23479. На поверхности проконтролированных основных материалов, полуфабрикатов, заготовок и готовых изделий ставится клеймо, подтверждающее положительные результаты контроля. Порядок и способы клеймения нормируются.

## **XVII. СПЕЦИФИКА ВИЗУАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ В РАЗЛИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

### **1. Контроль элементов энергетических объектов**

В требованиях НТД на энергетического оборудования широко используются такие понятия как однотипные контрольные сварные соединения и размерные показатели.

Однотипными сварными соединениями является группа сварных соединений, имеющих следующие общие признаки:

- способ сварки;
- тип основного металла (в одну группу допускается объединять сварные соединения деталей из сталей различных марок, для сварки которых предусмотрено применение сварочных материалов одних и тех же марок);
- одинаковый вид покрытия электродов (основной, рутиловый, целлюлозный, кислый);
- в одну группу допускается объединять соединения с номинальной толщиной:
  - до 3 мм включительно;
  - свыше 3 до 10 мм включительно;
  - свыше 10 до 50 мм включительно;
  - свыше 50;
- одинаковый радиус кривизны деталей в зоне сварки:
  - до 12,5 мм включительно;
  - свыше 12,5 до 50 мм включительно;
  - свыше 50 до 250 мм включительно;
  - свыше 250;
- вид сварного соединения: стыковое, угловое, тавровое, нахлесточное;
- форму подготовки кромок:
  - с односторонней разделкой кромок и углом скоса более  $8^0$ ;
  - с односторонней разделкой кромок и углом скоса менее  $8^0$  (уз-

- кая разделка);
- без разделки кромок;
  - способ сварки корневого слоя;
  - термический режим сварки: с предварительным и сопутствующим подогревом, без подогрева, с послойным охлаждением;
  - режим термической обработки сварного соединения.

Образцовым сварным соединением является часть соединения, вырезанная из производственных сварных соединений или сваренное отдельно, но являющееся идентичным по отношению к подлежащим проверке сварным соединениям.

Требования к организации и порядку производства по визуальному и измерительному контролю оборудования энергетических объектов устанавливает «Инструкция по визуальному и измерительному контролю» РД 34.10.130-96. Визуальный и измерительный контроль должен выполняться в соответствии с требованиями «Технологической карты контроля» или «Карт операционного контроля». В указанных картах приводятся контролируемые параметры, последовательность контроля, объемы контроля и нормы оценки результатов контроля, средства контроля, схемы выполнения замеров контролируемых параметров.

Разработку «программ технического диагностирования» проводит предприятие, выполняющее работы по техническому диагностированию, или специализированная организация.

К производственно-контрольным документам США, широко используемым во многих странах и регламентирующими требования к выполнению визуального и измерительного контроля, относятся ASME-Code и кодекс американского общества сварочной техники AWS D1.1.

При выполнении контроля необходимо:

- проверить квалификационный статус сварщика и действительность даты аттестации;
- проконтролировать, соответствует ли изготавляемый шов конструкторской документации, нет ли в месте, подготовленном для шва, дефектов;
- размеры притупления кромок, размеры угла разделки кромок, соответствуют ли одна другой части стыкового соединения, размеры зазоров, кольцевых прокладок и т.п.

Ниже, на основе [12] приведены основные требования к нормам оценки качества сварных соединений, работающих под давлением и выполненных дуговой, электрошлаковой, электронно-лучевой и га-

зовой сваркой, при визуальном и измерительном контроле.

В стыковых сварных соединениях элементов энергетического оборудования и трубопроводов с одинаковой номинальной толщиной стенки смещение (несовпадение) кромок свариваемых элементов (деталей) с наружной стороны шва не должно превышать значений, указанных в табл. 37.

Дефекты, выявленные при визуальном и измерительном контроле, приведены в табл. 38.

**Таблица 38. Максимально допустимое смещение (несовпадение) кромок в стыковых соединениях, мм**

Номинальная толщина стенки соединяемых элементов, $s$ , мм	Продольных меридиональных, хордовых и круговых на всех элементах, а также кольцевых при проварке днищ	Поперечных кольцевых	
		на трубных и конических элементах	на цилиндрических элементах или листа или поковок
0,5	0,20 $s$	0,20 $s$	0,25 $s$
>5...10	0,10 $s$ + 0,5	0,10 $s$ + 0,5	0,25 $s$
>10...25	0,10 $s$ + 0,5	0,10 $s$ + 0,5	0,10 $s$ + 1,5
>25...50	3(0,04 $s$ + 2,0)	0,06 $s$ + 1,5	0,06 $s$ + 2,5
50...100	0,04 $s$ + 1,0 (0,02 $s$ + 3,0)	0,03 $s$ + 3,0	0,04 $s$ + 3,5
Свыше 100	0,01 $s$ + 4,0 но не более 6,0	0,015 $s$ + 4,5 но не более 7,5	0,025 $s$ + 5,0 но не более 10,0

В табл. 38 значения, приведенные в скобках, могут быть допущены только в случаях, указанных в рабочих чертежах.

Измерительный контроль резьбовых деталей осуществляют калибрами или измерительными средствами, имеющими наконечники, подобные калибрам по форме. При проекционном контроле резьбовый профиль проецируется на экран и сравнивается с образцовым или с двумя предельными профилями.

При контроле энергооборудования необходим тщательный внешний осмотр лопаток, что является одним из важнейших элементов контроля их состояния. Лопатки всех ступеней турбины должны осматриваться дважды – до и после их очистки. При осмотре лопаток следует проверить:

- профильную часть лопаток, входные и выходные кромки по всей длине лопатки, головки шипов (легким простукиванием), бан-

- дажные проволоки, хвостовики лопаток в местах выхода из паза и перехода к профильной части;
- бандажную ленту у головок шипов лопаток;
  - состояние осевых и радиальных уплотнений на лопатках и бандажной ленте.

**Таблица 39. Нормы поверхностных дефектов в сварных соединениях**

Дефект	Допустимый максимальный размер, мм	Число дефектов
Выпуклость стыкового шва с наружной стороны	Устанавливается НТД или конструкторской документацией в зависимости от вида сварки и типа соединения	–
Западания (углубления) между валиками и чешуйчатость поверхности шва	0,12 РП <sup>*1</sup> + 0,6, но не более 2	–
Одиночные включения	0,12 РП <sup>*1</sup> + 0,2, но не более 2,5	При РП от 2 до 10 – 0,2РП + 3. При РП свыше 10 до 20 – 0,1РП + 4. При РП свыше 20 – 0,05РП + 5, но не более 8
Выпуклость корня шва при односторонней сварке труб без подкладных колец	1,5 при $D^{*2}$ до 25 мм включительно 2,0 при $D$ свыше 25 до 150 включительно 2,5 при $D$ свыше 150	–
Вогнутость корня шва при односторонней сварке труб без подкладных колец	0,12 РП + 0,4, но не более 1,5	–

В табл. 39 приняты обозначения: РП<sup>\*1</sup> – размерный показатель;  $D^{*2}$  – внутренний диаметр элемента, мм.

В случае обнаружения излома или трещины в лопатке необходимо зафиксировать место лопатки на диске, место излома по высоте лопатки, начало трещины (от входной или выходной кромки или отверстия), угол между направлением трещины и радиальной осью лопатки.

При обнаружении излома хвостовика лопатки в пазу диска необходимо осмотреть хвостовик всех лопаток этой ступени.

Характер изломов лопаток следует внимательно изучить. При усталостном изломе от вибрации поверхность излома в большей своей степени имеет гладкий участок зернистого строения. В остальной части излом имеет грубую кристаллическую структуру, характерную для разрыва от недостаточной механической прочности того участка лопатки, где проходила трещина.

Поверхность вибрационного излома может иметь четко выраженные линии усталости, что связано с остановками в продвижении трещины в глубь сечения лопатки при относительно небольших напряжениях. В этом случае по характеру расположения линии усталости можно определить преобладающее направление вибрации лопаток, приведшей к их поломке.

При колебаниях в тангенциальном направлении линии усталости расположены примерно параллельно хорде лопатки, а при колебании в аксиальном направлении – перпендикулярно ей. Начало излома (появление трещины) в большинстве случаев происходит со стороны выходной кромки. Плоскость излома от изгибных колебаний примерно перпендикулярна к радиальной оси лопатки.

Преобладание повреждений в крайних лопатках пакета может служить одним из показателей наличия резонансных аксиально-крутильных колебаний, которые вызывают максимальные напряжения именно в крайних лопатках пакета.

Для входных ступеней турбины, кроме того, необходимо зафиксировать величину и характер эрозионного износа лопаток.

Эрозионный износ входных кромок фиксируется на эскизе очерчиванием кромки изношенной части лопатки на миллиметровой или на плотной бумаге. Измерения должны проводиться каждый раз на одних и тех же лопатках (на четырех-пяти лопатках ступени).

Особо тщательное наблюдение следует вести за эрозией кромок лопаток последних ступеней мощных турбин. Осмотр этих лопаток должен проводиться не только во время капитальных, но и при текущих ремонтах.

## **2. Контроль элементов нефтеперерабатывающих объектов**

Требования к визуальному и измерительному контролю стальных сварных сосудов и аппаратов, предназначенных для эксплуатации под внутренним избыточным давлением свыше 10 до 130 МПа при температуре стенки не ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  и не выше  $525^{\circ}\text{C}$ , уста-

навливает ГОСТ Р 50599-93. Корпуса сосудов и аппаратов классифицируются следующим образом:

- *кованые*, изготовленные из одной кованой обечайки;
- *кованосварные*, изготовленные из однослойных кованых обечаек;
- *многослойные рулонированные*, изготовленные из нескольких рулонированных обечаек, сваренных между собой кольцевыми швами;
- *вальцованные*, обечайки которых изготовлены методами вальцовки из толстолистовой стали с последующей сваркой продольными швами, а затем соединены кольцевыми сварными швами между собой и концевыми элементами;
- *штампосварные*, обечайки которых изготовлены из толстолистовой стали методом штамповки полуобечаек с последующей сваркой их продольными швами между собой и концевыми элементами.

При эксплуатации сосудов и аппаратов их визуальный осмотр осуществляют при всех видах технического освидетельствования: периодическом, дополнительном, внеочередном, после монтажа.

Контроль аппаратов, для которых невозможно проведение полного внутреннего осмотра, должен предусматривать визуальный осмотр наружной и внутренней поверхностей в доступных местах, или осмотр с помощью технических эндоскопов или других оптических приборов.

После гидравлических испытаний предусматривается повторный визуальный осмотр сварных швов корпусов сосудов и аппаратов, а также визуальный контроль ремонтных мест.

### **3. Контроль трубопроводов**

В зависимости от назначения и расположения трубопроводы подразделяются на промысловые, магистральные, технологические и продуктопроводы. К основным элементам любого трубопровода независимо от назначения относят следующие:

- *линия* – участок трубопровода для транспортировки продукта, рабочие параметры которого постоянны (каждая линия трубопровода имеет в проекте свой индекс);
- *деталь* – элементарная часть трубопровода: патрубок, отвод, переход, тройник, седловина, заглушка, фланец и т.п.;
- *элемент* – две или более сваренные между собой детали;
- *узел* – часть линии трубопровода, ограниченная транспортными га-

- баритами. Узлы подразделяются на плоские и пространственные;
- **блок** – часть линии трубопровода, состоящая из одного или нескольких узлов, арматуры и отрезков труб, которая по размерам и конфигурации может быть установлена в проектное положение без предварительного укрупнения;
  - **секция** – часть линии трубопровода, состоящая из нескольких сваренных между собой труб одного диаметра;
  - **плеть** – часть линии трубопровода, состоящая из нескольких сваренных между собой секций трубопроводов.

В трубопроводах применяют большое число фасонных частей и деталей. При входном контроле труб, предназначенных для сооружения промысловых и магистральных трубопроводов, проверяют:

а) соответствие указанных в сертификатах (паспортах) химического состава и механических свойств металла показателям, предусмотренным в соответствующих ГОСТах или ТУ;

б) визуальным контролем:

- наличие маркировки и соответствие ее имеющимся сертификатам (паспортам);
- отсутствие недопустимых вмятин, задиров и других механических повреждений, metallургических дефектов и коррозии;
- отсутствие на торцах забоин, вмятин, наличие разделки под сварку;

в) инструментальным контролем:

- толщину стенки по торцам;
- овальность по торцам;
- кривизну труб;
- косину реза торцов труб;
- отсутствие расслоений на концевых участках труб;
- размеры обнаруженных забоин, рисок, вмятин на теле и на торцах.

*Трубы считаются годными при условии, что:*

- отклонения наружного диаметра трубы по длине не менее 200 мм от торца не превышают для труб диаметром до 800 мм величин, соответствующих ГОСТАм и ТУ, а для труб диаметром выше 800 мм –  $\pm 2$  мм;
- отклонения толщины стенки по торцам не превышают предельных значений, регламентированных соответствующими ГОСТ и ТУ;
- овальность бесшовных труб не выводит их наружный диаметр за предельные отклонения, а сварных труб, диаметром 426 мм и бо-

лее, не превышает 1 % номинального наружного диаметра (при этом овальность определяется как отношение разности величин наибольшего и наименьшего измеренных диаметров торца обследуемой трубы к номинальному диаметру);

- кривизна труб не превышает 1,5 мм на 1 м длины, а общая кривизна – не более 0,2 % длины трубы;
- косина реза торцов труб не превышает 2,0 мм;
- на концевых участках труб отсутствуют расслоения любого размера, выходящие на кромку или поверхность трубы;
- глубина царапин, рисок и задиров на поверхности труб (деталей, арматуры) не превышает 0,2 мм; на теле и торцах трубы отсутствуют вмятины;
- в местах пораженных коррозией, толщина стенки трубы не выходит за пределы минусовых допусков.

*При сборке соединений под сварку контролируют:*

- чистоту полости труб и степень зачистки кромок и прилегающих к ним внутренней и наружной поверхностей;
- соблюдение допустимой разностенности свариваемых элементов (труб, труб с деталями трубопроводов и пр.);
- соблюдение допустимой величины смещения наружных кромок свариваемых элементов;
- величину технологических зазоров в стыках;
- длину и количество прихваток.

*При осмотре сварного соединения:*

- проверяют наличие на каждом стыке клейма сварщика, выполнившего сварку. Если сварку одного стыка выполняли несколько сварщиков, то на каждом стыке должно быть проставлено клеймо каждого сварщика в каждой бригаде, или одно клеймо, присвоенное всей бригаде;
- проверяют наличие на одном из концов каждой плети ее порядкового номера;
- убеждаются в отсутствии наружных трещин, незаплавленных кратеров и выходящих на поверхность пор.

По результатам обмера сварные соединения, выполненные методами дуговой сварки, должны удовлетворять следующим требованиями:

- величина наружного смещения кромок не должна превышать значений, приведенных в ВСН 012-88;
- глубина подрезов не должна превышать значений, приведенных в

ВСН 012-88;

- усиление внешнего и внутреннего швов должно иметь высоту не менее 1,0 мм и не более 3,0 мм и плавный переход к основному металлу;
- сварной шов облицовочного слоя должен перекрывать основной металл:
  - при ручной сварке на 2,5...3,5 мм;
  - при сварке порошковой проволокой на 1,5...3,5 мм;
- сварной шов облицовочного слоя, получаемого при автоматических методах сварки под слоем флюса, должен иметь ширину, указанную в ВСН 012-88;
- подварочный слой, выполненный ручной сваркой, должен иметь ширину в пределах 8...10 мм;
- внутренний шов, получаемый при двусторонней автоматической сварке и при автоматической подварке, должен иметь ширину, не превышающую значений, приведенных в ВСН 012-88.

#### **4. Визуально-оптический контроль авиационной техники**

В условиях эксплуатации авиационной техники визуально-оптический контроль выполняют при плановых регламентных работах, при предполетном и послеполетном осмотрах.

*Визуально-оптический контроль в авиации применяют:*

- для поиска трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, язв, расслоений, раковин и т.п.;
- для обнаружения остаточной деформации элементов конструкций, загрязнений, а также различных посторонних предметов внутри закрытых полостей;
- для выявления зон изменения оптических свойств поверхности деталей (цвета, яркости, блеска), например, мест перегрева по изменению цвета металла или покрытия;
- для обнаружения течей баков, трубопроводов и их резьбовых соединений пробок, заглушек и т.п.;
- для поиска более мелких трещин при капиллярном и магнитопорошковом контроле.

*Визуально-оптическому контролю, как правило, подвергают:*

- элементы панели крыла в наиболее нагруженных зонах;
- аэродинамические гребни, узлы навески рулей и закрылков, стыковочные узлы и т.п.;

- все детали и узлы шасси;
- элементы подвески двигателей;
- детали управления самолетом: качалки, кронштейны, концевые участки тяг, монорельсы, узлы крепления гидро- и электроагрегатов;
- детали воздушных винтов, кромки лопастей, обтекатели, замки обтекателей и др.

Порядок и перечни осматриваемых деталей и узлов определяются типом обслуживаемой техники, опытом ее испытания в процессе разработки конструкции, наличием встроенных средств контроля, типом наружных средств неразрушающего контроля.

Частые проверки предусматривается выполнять визуально. Проверки с большей периодичностью проводят с применением инструментальных средств контроля, включая оптические приборы. Чаще проверяются высоконагруженные и ответственные детали.

Для стареющих типов техники предусматривается расширение применения средств контроля. При этом затраты на неразрушающий контроль самолетов планируются до 60 % эксплуатационных трудозатрат. Из них иногда до 40 % трудозатрат приходится на визуально-оптический контроль. Плановый комплексный контроль выполняют как на специализированных базах технического обслуживания, так и непосредственно в местах использования техники.

## **XVIII. ДЕФЕКТЫ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНО ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

### **1. Трешины различного рода и их происхождение**

Визуально-оптический периодический осмотр особенно важен для металлоконструкций, срок эксплуатации которых истек. Практически все структурные изменения металла отражаются на его поверхности и большинство опасных дефектов, приводящих к авариям, начинают свое развитие с поверхности. Рассмотрим наиболее распространенные дефекты, появляющиеся на поверхности продолжительно работающих металлоконструкций. Это трещины хрупкого, вязкого, замедленного разрушения, трещины ползучести, коррозионного растрескивания, водородного охрупчивания и др. При динамических и термических нагрузках возникают усталостные трещины, износ сопрягаемых поверхностей и пр.

*Трещина*, как правило, образуется в материале деталей при воздействии нагрузок, превышающих прочность. *Трещиной вязкого разрушения* называют трещины, если деформация происходит в объеме, соизмеримым с объемом детали. Если в зоне образования трещины отсутствуют видимые следы макропластической деформации, трещина называется *хрупкой*.

Вязкие трещины имеют внутризеренный характер распространения ориентированы либо нормально к направлению действия растягивающих напряжений, либо совпадают с направлением действия касательных напряжений. Хрупкое разрушение может иметь как внутризеренный, так и межзеренный характер, приводя соответственно к образованию металлического или зернистого излома. Хрупкие трещины располагаются по поверхностям, перпендикулярным к направлению действия наибольших растягивающих напряжений. Хрупкое разрушение, наступающее с течением времени под воздействием статической нагрузки при малых напряжениях, меньших предела прочности без влияния повышенной температуры и коррозионных активных сред, называется замедленным. К факторам, повышающим склонность материалов к замедленному хрупкому раз-

рушению, относят наличие в них водорода.

Возникновению трещин замедленного разрушения способствует наличие на поверхности детали хрупкого слоя, монтажные, эксплуатационные воздействия. Часто решающим фактором является действие внутренних растягивающих напряжений, возникающих при сварке, закалке, механической обработке и пр. При замедленном разрушении могут наблюдаться как множественные, так и единичные трещины. При этом виде разрушения характер трещин в существенной степени определяется классом и структурой материала. Так, алюминиевые сплавы медленно разрушаются, как правило, по границам зерен; стали – часто по телу зерен.

Трещины после пластического течения материала под воздействием постоянного напряжения при относительно высоких температурах называются *трещинами ползучести*. Для ползучести является характерным множественное трещинообразование. Материалы, которые ранее деформировались по типу вязкого транскристаллического сдвига, могут разрушаться в результате разделения по границам зерен.

Часто причиной аварии являются поверхностные или внутренние дефекты сварки, как концентраторы напряжений. Приведем такой пример. Так, анализ наиболее характерных причин отказов газопровода в районе Якутска выявил, что более 50 % отказов приходится на сварные кольцевые швы с образованием сквозной трещины. Изучение причин их образования показывает, что основными очагами разрушения служат дефекты сварки, являющиеся концентраторами напряжений. Установлено, что трещины размерами от 10 до 30 мм составляют более 55 % общего количества обнаруженных дефектов трубопровода.

Общую последовательность развития разрушения трубопровода можно представить следующим образом. В результате циклических колебаний рабочего давления около дефектов сварки в структуре металла накапливаются повреждения, которые служат зародышем магистральной трещины. С образованием сквозной трещины-свища происходит хрупкое или квазихрупкое распространение трещины по металлу, чаще всего кольцевого шва с последующим выходом в основной металл.

Изломы разрушившихся труб и сварных соединений, как правило, имеют хрупкое строение без видимых пластических деформаций с характерным для этого вида шевронным узором. Основным механизмом разрушения является отрыв, однако имеются и

вязкие разрушения основного металла труб с незначительной утяжкой, при этом разрушение происходит по механизму сдвига.

Статистический анализ отказов работы газопровода показал, что частота разрушений имеет определенную связь со сменой времени года, то есть с сезонными колебаниями температуры грунта и газа. Наибольшее количество отказов приходится на осенние месяцы, именно в этот период произошло более 40 % всех разрушений.

Из-за старения металла труб существенно снижается сопротивляемость сварных соединений и основного металла хрупкому разрушению; происходит необратимое изменение механических свойств и трещиностойкости. В этих условиях возрастает риск катастрофических разрушений, прежде всего на участках газопроводов, смонтированных более 30 лет назад.

Визуальные и фрактографические обследования фрагментов разрушившихся труб на 185-м километре этого газопровода в районе Якутска показывают, что очаг разрушения расположен в околосотовой зоне, имеет достаточную протяженность и имеет замедленное развитие в виде усталостной трещины по основному металлу, о чем свидетельствует окисление поверхности трещин. Непосредственный очаг усталостного разрушения, имеющий коррозионное растрескивание, покрыт толстым слоем коррозии и отложений органических продуктов. Зона распространения трещины имеет протяженность 30 мм и глубину 3,5 мм, где просматриваются бороздчатые структуры, свидетельствующие об усталостном росте трещины. Видны продукты коррозии. *Общую продолжительность роста данной трещины можно оценить от нескольких до десятков лет.* Изломы очага распространения трещины указывают на хрупкий вид, разрушение происходило механизмом отрыва, на местах остановки трещины переходящим в квазихрупкий вид с пластическими составляющими. Спектральным анализом установлено, что материалы разрушившихся труб соответствуют маркам стали 17Г1С и 09Г2С. Наибольшее разрушение произошло по основному материалу стали 17Г1С.

Свищ длиной 33 м образовался от сварного дефекта – канальной поры размером 15 × 2 мм.

Истечение газа было направлено в сторону грунта, и в результате действия свища как сопла возникла реактивная сила, послужившая началом разрыва кольцевого сварного шва с последующим выбросом труб от оси укладки на расстояние 30...50 м. Можно видеть, что более новая труба остановила трещину, а старая рассыпала

лась на осколки. В металле старой трубы накопилось столько повреждений, что любое нарушение сплошности тела приводило к спонтанному разрушению осколочного характера.

Таким образом, рассмотренное разрушение показывает, что наличие усталостных трещин, образовавшихся в результате много летней эксплуатации, и старения металла явилось условием для исчерпания несущей способности. Для исключения повторения подобной аварии следует периодически проводить визуально-измерительный контроль состояния защитного покрытия, адгезионной прочности защитного покрытия, контроль состояния внешней поверхности трубопровода и другие исследования.

Как при статическом, так и при переменном нагружении металла особую опасность вызывает коррозионное поражение.

## 2. Коррозия металлов

*Коррозия металлов* – это физико-химическое взаимодействие металла со средой. В результате коррозии ежегодно теряется более 1 % всего металла, эксплуатируемого человечеством. В сумме косвенные и прямые убытки от коррозии металлов и затраты на защиту (в соотношении примерно 3,5:1:1) в промышленно развитых странах достигают 4 % национального дохода.

Коррозионные процессы классифицируют по:

- механизму взаимодействия металла со средой;
- типу коррозионной среды;
- виду коррозионных разрушений на поверхности;
- характеру дополнительных воздействий, которым подвергается металл одновременно с действием коррозионной среды.

Механизм коррозии металла определяется типом агрессивной среды. В сухих окислительных газах при повышенных температурах на поверхности большинства конструкционных металлов образуется слой твердых продуктов коррозии (окалина). Скорость такой коррозии лимитируется диффузией ионов металла через слой окалины к границе слой–газ или окислителя (например  $O_2$ ) к границе слой–металл.

Иной механизм имеет очень распространенная коррозия металлов в электролитических средах. В этом случае атом металла и частица окислителя непосредственно не контактируют и процесс включает две реакции: анодное растворение металла и катодное

восстановление окислителя. По типу коррозионной среды выделяют коррозию в природных средах: атмосферную, морскую, подземную, биокоррозию.

Многообразны виды коррозии металлов в контакте двух разнородных металлов, образующих замкнутый гальванический элемент в узких зазорах между деталями, куда может проникать электролит, щелочах, органических средах, расплавах солей и т.п.

Коррозию делят на равномерную и неравномерную в зависимости от того, одинакова ли глубина коррозионного разрушения на разных участках. При местной коррозии поражения локальны и оставляют практически незатронутой подавляющую часть поверхности (рис. 87). В реальных условиях опасность локальных коррозионных разрушений чаще всего выше опасности равномерной коррозии.

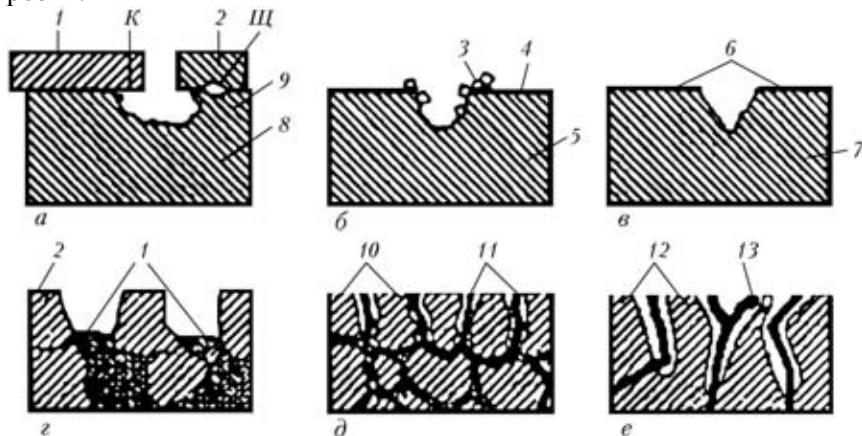


Рис. 87. Различные схемы локального коррозионного воздействия:  
 а – контактная (К) и щелевая (Щ); б – «обесцинкование», «обезникеливание», «обезалюминивание»; в – точечная коррозия; г – избирательная коррозия; д – распад по границам зерен; е – «губчатая» коррозия в чугуне;  
 1 – участок благородного металла; 2 – участок неблагородного металла;  
 3 – кристаллы чистой меди; 4, 6 – покровный слой; 5 – медный слой;  
 7 – металл; 8 – благородная фаза; 9 – неблагородная фаза; 10 – основной  
 металл; 11 – выделения по границам зерен, например, карбиды;  
 12 – перлит, феррит; 13 – графит

Причины локальной коррозии металлов разнообразны: различия в составе зерна металла в объеме и на границе, концентрация механических напряжений, микровключения, разная природа кон-

тактирующих металлов, диффузионная неравнодоступность участков поверхности и т.п. Участки поверхности металла, на которых наблюдается повышение значения анодного тока коррозии, могут быть макро- или микроскопическими. На первых возникает обычно контактная коррозия в месте соединения разнородных металлов, щелевая коррозия (внутрищелевая поверхность – анод, открытая – катод), на поздних стадиях – питтинговая коррозия; на вторых – межкристаллитная коррозия и на ранних стадиях – питтинговая коррозия. Рост коррозионных трещин в ряде случаев объясняется анодным процессом, локализованным в вершине трещины.

В зависимости от степени локализации различают коррозионные пятна, язвы (питтинг) и точки. Точечные поражения могут дать начало подповерхностной коррозии, распространяющейся в стороны под очень тонким, например, наклепанным слоем металла, который затем вздувается пузырями или шелушится. Наиболее опасные виды местной коррозии – *межкристаллитная (интеркристаллитная)*, которая, не разрушая зерен металла, продвигается вглубь по их менее стойким границам, и *транскристаллитная*, рассекающая металл трещиной прямо через зерна. Почти не оставляя видимых следов на поверхности, эти поражения могут приводить к полной потере прочности и разрушению детали или конструкции. Близка к ним по характеру *ножевая* коррозия, словно ножом разрезающая металл вдоль сварного шва при эксплуатации некоторых сплавов в особо агрессивных растворах. Иногда специально выделяют поверхностную *нитевидную* коррозию, развивающуюся, например, под неметаллическими покрытиями, и *послойную* коррозию, идущую преимущественно в направлении пластической деформации. Специфична *избирательная* коррозия, при которой в сплаве могут избирательно растворяться отдельные компоненты твердых растворов (например, обесцинкование латуней).

В коррозионно-механические разрушения входят: коррозионное растрескивание, коррозионная усталость, фреттинг-коррозия, водородное охрупчивание, эрозионная коррозия, кавитационная коррозия. Скорость коррозии характеризуется появлением коррозионных очагов за определенный промежуток времени; уменьшение толщины металла, отнесенное к единице времени и т.п.

Точечная коррозия или питтинги возникают главным образом в защитном слое по местам различных дефектов (трещин от внутренних напряжений, пор, микровключений, выхода на поверхность границ зерен, дислокаций и т.п.). В зависимости от продолжитель-

ности питтинговой коррозии и других факторов глубина и попечник питтинга могут изменяться от мкм до см. Питтнги могут нарушать функционирование самых различных изделий – от тонких мембран и проводников микросхем до толстостенных аппаратов, емкостей, труб. Среди причин коррозионных повреждений химического и энергетического оборудования доля питтинговой коррозии составляет от 15 до 50 %. От питтингов часто развиваются коррозионные трещины.

*Межкристаллитная коррозия* – это преимущественное разрушение металла вдоль границ зерен. При незначительных общих коррозионных потерях разрушение проникает на большую глубину и сопровождается снижением прочности и пластичности материала, что, в конечном счете, приводит к выходу из строя всей конструкции. Межкристаллитной коррозии подвержены ферритные, аустенитные, аустенитно-ферритные стали и другие материалы, имеющие, как правило, неоднородную структуру. Межкристаллитная коррозия – электрохимический процесс, обусловленный тем, что твердый раствор может расслаиваться с образованием по границам зерен фаз, обогащенных каким-либо компонентом материала (так называемые избыточные фазы), а участки, непосредственно прилегающие к границам зерен, оказываются объединенные этим компонентом (обедненные зоны). Под действием агрессивной среды происходит избирательное анодное растворение либо самих избыточных фаз, либо соседних с ними объединенных зон.

Анализ случаев выхода из строя нефтехимического оборудования по причине межкристаллитной коррозии показал, что разрушение обычно происходит в сварных швах и по зоне термовлияния.

*Коррозионное растрескивание* происходит при одновременном воздействии статических растягивающих напряжений и коррозионной среды и подобно хрупкому разрушению практически без пластической деформации макрообъемов металла. Неприменным условием такой коррозии является локализация процесса на наиболее напряженных местах поверхности. Это могут быть трещины в защитных покрытиях, границы зерен, выходы дислокаций. В зависимости от особенностей структуры металла и состава коррозионной среды коррозионное разветвление может быть меж- или транскристаллитным. В процессе развития коррозионной трещины (сильно разветвленной) различают инкубационный период, периоды развития трещины и хрупкого разрушения объекта. Таким образом, поверхностные и внутренние напряжения влияют на все виды

коррозионного поражения.

Проведены многочисленные исследования возникновения стресс-коррозии в магистральных трубопроводах. Дефекты стресс-коррозии образуются только на наружной поверхности труб и имеют вид колоний коротких трещин, ориентированных в одном направлении, параллельном оси трубы.

На углах поворотов трубопровода направление трещин может меняться. Колония стресс-коррозионный трещин на поверхности труб в большинстве случаев имеет узконаправленное распределение – зона шириной около 400 мм, длиной 10...12 м (по всей длине трубы), с переменной глубиной. Для труб с одинаковыми параметрами колония стресс-коррозионных трещин может переходить через сварной кольцевой шов, распространяясь на смежные трубы. Все колонии стресс-коррозии образуются в зоне расположения продольного заводского шва. При этом трещины, как правило, располагаются с одной стороны шва, а также могут переходить на длине одной трубы на другую сторону продольного шва или распространяться одновременно на каждой из сторон продольного шва.

При классическом нагружении трубопровода внутренним давлением главные напряжения действуют в параллельном оси трубы направлении и в кольцевом – в направлении по периметру трубы.

В соответствии с нормативными требованиями максимальный уровень напряжений от внутреннего давления в трубопроводе не должен превышать 0,70...0,72 от предела текучести металла трубы, что и обеспечивает нормативный запас прочности трубопровода. При такой схеме нагружения стенки трубы кольцевые напряжения в два раза превышают продольные, что создает приоритет инициированию и развитию только продольно ориентированных трещин под действием нормально приложенных напряжений.

Кроме транспортируемого продукта, на металл трубы действуют различные внешние нагрузки и остаточные напряжения, зависящие от способа изготовления труб.

Прямошовные трубы производятся из листа методом формовки по оправке до кольца (одношовные трубы) или полукольца (двухшовные трубы). Холодная формовка листа-заготовки состоит из процедур:

- подгибки кромок листа на прессе;
- свободной штамповки листа в U-образную заготовку;
- обжатия заготовки в О-образную форму в прессе;
- трехслойной сварки продольного шва;

- калибровка диаметра труб – гидравлического экспандирования высоким давлением.

При производстве прямозовных труб металл подвергается упругому и пластическому деформированию.

В табл. 40 приведены расчетные и экспериментальные значения главных напряжений (в процентах от предела текучести металла труб) от действия постоянных нагрузок на наружной и внутренней поверхности трубы. Как видно из таблицы 40, на внутренней поверхности трубы за счет действия приложенных с разным знаком напряжений произошла компенсация кольцевых напряжений, что привело к снижению на 10...30 % кольцевых напряжений.

На наружной поверхности трубы, наоборот, кольцевые напряжения растяжения увеличились и приблизились к критическим значениям предела текучести. Продольные напряжения остались без изменения.

**Таблица 40. Расчетные и экспериментальные значения главных напряжений**

Виды воздействия	Кольцевые напряжения $\sigma_{0,2}$ , %		Продольные напряжения $\sigma_{0,2}$ , %	
	внутренняя поверхность	наружная поверхность	внутренняя поверхность	наружная поверхность
Рабочее давление	+70	+68	+35	+34
Остаточные напряжения	-(10 – 30)	+(10 – 30)	0	0
Результирующая составляющая главных напряжений	+(40 – 60)	+(78 – 98)	+35	+34

Остаточные напряжения распределены по окружности трубы неравномерно, а именно: в зоне, прилегающей с обеих сторон к продольному сварному шву, прирост дополнительных напряжений составляет 30 %, а на остальной части окружности – 10 %. В одношовных трубах ширина зоны повышенных напряжений составляет 26 % от длины окружности трубы, а в двухшовных – 52 %, что в целом определяет работу двухшовных труб при более высоких напряжениях.

Таким образом, при производстве труб распределение напряжений изменяется, и максимальные напряжения, причем на уровне предела запаса прочности, возникают на внешней поверхности

*труб, в кольцевом направлении, в околоводной зоне продольного шва.*

В работе [5] дана оценка разного знака напряжений при производстве, эксплуатации, температурных и других воздействиях на трубопроводы.

Если рассматривать материал трубопровода как анизотропный с равномерно распределенными докритическими дефектами различного происхождения, то в соответствии с полученным распределением эксплуатационных напряжений развитие стресс-дефектов в первую очередь происходит:

- на наружной поверхности стенки трубы;
- в зоне влияния продольного сварного шва;
- на головном участке трубопровода.

Развитие дефектов, ориентированных в направлении оси трубы, происходит на прямолинейной части трубопровода, а ориентированных перпендикулярно оси трубопровода – на углах поворотов. Поэтому следует различать коррозионное растрескивание под напряжением, требующее растягивающего напряжения, и межкристаллитную коррозию, которая возникает и в отсутствие напряжения.

Коррозионное растрескивание следует также отличать от разрушения в результате коррозионной усталости. Последний термин применим к растрескиванию металла, подвергающегося циклам повторного или знакопеременного напряжения в коррозионной среде.

*Фреттинг-коррозия* появляется в местах контакта плотно сжатых или катящихся одна по другой деталей, если в результате вibrаций между их поверхностями наблюдаются микроскопические смещения сдвига.

Под влиянием растворенного водорода металлы могут настолько охрупчиваться, что уже при приложении малого растягивающего напряжения образуются трещины водородной хрупкости. Источниками поступления водорода могут являться термическая диссоциация воды при металлургических процессах (литье, сварке), диссоциация газов, коррозия, гальванические процессы и т.п.

При диффузии водорода извне границы зерен оказываются наиболее благоприятными путями диффузии; они тем самым вносят преимущественный вклад в охрупчивание. Другими благоприятными путями проникновения водорода являются поры и неметаллические включения.

Разрушение, вызванное воздействием водорода, происходит интенсивнее под действием внешней медленно возрастающей или

постоянной статической нагрузки; при наличии остаточных напряжений; холодной деформации; в результате закалки; низких температур (но выше  $-70^{\circ}\text{C}$ ).

### 3. Дефекты от воздействия динамических нагрузок

*Износ* – это изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия вследствие механического воздействия. Это поверхностное явление, происходящее от взаимодействия поверхностей.

По условиям внешнего воздействия на поверхностный слой различают: абразивный, эрозионный, адгезионный и другие виды износа.

*Абразивный износ* – это следствие трения под давлением одной поверхности по другой с достаточно большим выделением тепла. Абразивный износ – это непреднамеренная механическая обработка.

*Эрозионный износ* появляется тогда, когда твердые частицы с большой скоростью и в большом количестве перемещаются в таких сборках, как насосы, крыльчатки, паропроводы, сопла, трубопроводы с резкими изгибами. Эрозионный износ может изменить форму лопастей крыльчаток, лопаток турбин.

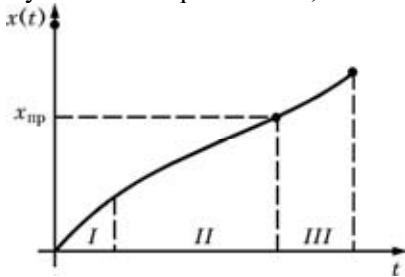


Рис. 88. Характер процесса изнашивания по периодам:  
I – приработка; II – нормального рабочего износа; III – интенсивного изнашивания

*Износ за счет адгезии* можно охарактеризовать как микросварку, которая возникает в том случае, когда выступы одной поверхности входят в контакт с выступами другой поверхности с выделением достаточно большого количества тепла.

При определении предельного износа следует учитывать нелинейные временные зависимости. Износ может обуславливать скачкообразный характер изменения состояния агрегата.

При определенном износе на кладок тормоза грузоподъемной машины происходит скачкообразное изменение кинематических взаимодействий (рис. 88).

По критерию интенсивного возрастания предельный износ должен быть установлен в момент резкого возрастания износа.

## 4. Усталость и выносливость

Процесс постепенного накопления повреждений и разрушение металлов под действием многократно приложенных нагрузок носит название *усталость*.

Свойство металла продолжать работы носит название *выносливость*.

Чтобы подчеркнуть сложность и важность проблем, связанных с усталостью, достаточно указать, что она ответственна примерно за 50 % случаев всех аварий.

И действительно, большинство разрушений происходит от усталости и сравнительно меньше – от статических нагрузок.

Теории усталостного разрушения основываются на представлении о сдвигах, происходящих в полосах скольжения и приводящих к образованию интрузий и экструзий.

Скольжение – это перемещение части плоскостей внутри кристаллической решетки (рис. 89, *в*, *г*).

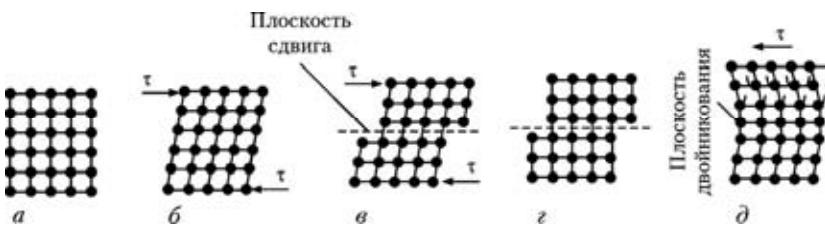


Рис. 89. Упругая и пластическая деформация металла под действием напряжения сдвига  $\tau$ :

*а* – первоначальный кристалл; *б* – упругая деформация; *в* – увеличение упругой и появление пластической деформации, вызванной скольжением при нагружении больше предела упругости; *г* – напряжение, обусловливающее появление сдвига (после сдвига сохранилась остаточная деформация); *д* – образование двойника

*Двойникование* – это такая форма скольжения, при которой параллельные плоскости кристалла движутся одна относительно другой так, что решетка по одну сторону от плоскости двойникования представляет собой зеркальное отображение решетки на другой стороне (рис. 89, *д*).

В полосах скольжения на поверхности деталей, подвергнутых знакопеременной нагрузке, можно наблюдать с помощью элек-

тронных микроскопов выдавливание тонких лепестков металла, называемых экструзиями (рис. 90).

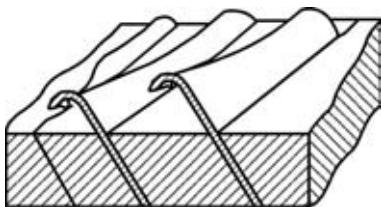


Рис. 90. Схема образования экструзии



Рис. 91. Линии скольжения, вызванные циклическим нагружением (в сечении)

но-оптическом контроле.

Наиболее характерной чертой усталостного разрушения является отсутствие деформаций в районе разрушения даже в таких материалах, как мягкие стали, которые высокопластичны при статическом разрушении.

Усталостные трещины обычно мелкие и их трудно обнаружить до достижения ими макроскопических размеров, после чего они быстро распространяются и вызывают полное разрушение за короткий промежуток времени.

Обычно усталостные трещины зарождаются в зоне изменения формы, нарушений поверхности деталей и в районе дефектов. Поверхности усталостного излома имеют характерный вид. Обычно они содержат две или три визуально различимые зоны.

Около области зарождения трещины, где усталостная трещина распространялась медленно, поверхность часто напоминает полированную.

Вдавливание или углубление этих полос, проиллюстрированное на рис. 91, принято называть интрузией. С этими понятиями связывают механизм усталости металлов, сокращения срока его жизни.

Локальная пластическая деформация (полосы скольжения и двойникование) могут быть источниками усталостных трещин.

При высоких амплитудах напряжения, как и при повышенных температурах, микротрещины могут развиваться и на границах зерен.

Источники трещин, как правило, концентрируются на поверхности или в подповерхностных слоях. Многие из них обнаруживаются при визуаль-

Во второй, менее гладкой, зоне трещина распространялась быстрее, и поверхность разрушения имела нерегулярный характер.

Третья зона представляет собой поверхность, по которой проходит окончательное разрушение. Эта зона может иметь либо кристаллическую (хрупкое разрушение), либо волокнистую (вязкое разрушение) поверхности.

*Трещины термической усталости.* Разрушение деталей после многократного воздействия, периодически изменяющегося во времени уровня термических напряжений представляет собой явление термической усталости. Разрушение при термической усталости наступает при значительных знакопеременных пластических деформациях при общем числе циклов, характерном для повторно-статических нагрузений.

Термическая усталость является особенно серьезной проблемой, например, в газовом хозяйстве, где температура деталей изменяется с большой скоростью, в самолетных конструкциях, подвергающихся кинетическому нагреву; при эксплуатации электростанций, где поверхность металла повторно нагревается и охлаждается.

На термоусталость деталей влияют конструктивные и технологические факторы: образование трещин бывает связано с наличием конструктивных концентраторов напряжений – в местах изменения сечений, у отверстий, в галтелях, в зонах сварных швов, а также в местах с наиболее окисленными поверхностными слоями.

Внутренние metallургические дефекты могут не оказывать существенного влияния на термоусталость, если место их расположения не совпадает с местами наибольших температурных перепадов и концентрации деформаций.

Для разрушения при термической усталости характерно множественное возникновение трещин, что объясняется локальностью действия термических напряжений и относительно быстрой их релаксацией.

Характерными для термоусталости являются трещины с широкими полостями и тупыми окончаниями – трещины «разгара». Стенки большинства трещин интенсивно окислены. Степень окисления даже соседних трещин может быть различной, что свидетельствует о неодновременном возникновении трещин и об относительно медленном их развитии.

При наличии на пути трещин границы зерна, ориентированной под острым углом к их траектории, трещины могут ветвиться. Такие трещины называются «паукообразными».

Действие повторных нагревов сопровождается сложным комплексом явлений, проходящих в материалах при высоких температурах – окислением, старением, рекристаллизацией, ползучестью.

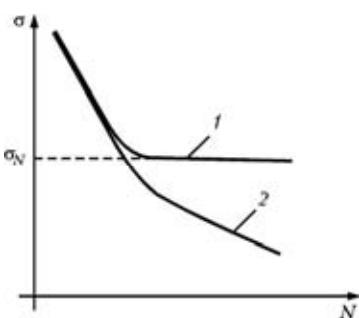


Рис. 92. Кривые усталости металла на воздухе (1) и в коррозионной среде (2):  $\sigma$  – напряжение;  $N$  – количество циклов нагружения;  $\sigma_N$  – предел выносливости на воздухе

агрессивности среды – коррозионного.

Одновременное действие коррозионной среды и переменного напряжения оказывает более сильное влияние, чем их суммарное, но раздельное действие. Разрушение при коррозионной усталости может начаться при напряжениях значительно ниже предела выносливости.

Коррозионно-усталостное разрушение начинается, как правило, после повреждения поверхности, образования на ней язв, каверн и межкристаллитной коррозии. От этих очагов может практически одновременно начаться развитии многих трещин.

Коррозионно-усталостные трещины – это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками. Они менее ориентированы, чем при усталостном разрушении без коррозионного влияния среды.

*Трецины контактной усталости.* Особый вид разрушения представляют собой контактные усталостные выкрашивания, образующиеся на поверхности металлических деталей при многократном приложении контактных нагрузок и относительном возвратно-поступательном движении.

Поверхностные контактные разрушения – фреттинг-коррозия или контактная усталость – являются не полным разрушением, а сочетаниями многочисленных, часто не очень мелких сколов.

Контактное усталостное выкрашивание (образование питтингов) с последующим развитием усталостного разрушения по сечению деталей наблюдается в таких деталях, как подшипники качения и скольжения, на зубьях шестерен, замковых соединениях и пр.

Причиной образования питтинга служат местные перегрузки или недостаточная смазка. Такие большие силы трения могут привести к образованию длинных деформационных языков, которые вызывают питтинговое разрушение боковых сторон зубьев шестерен.

*Кавитационное растрескивание.* Кавитация означает образование полости на поверхности твердого тела при разрушении газообразных пузырьков.

Лопающиеся пузырьки производят разрушения в слое металла на границе с жидкостью.

Усталостная кавитация наблюдается, когда колеблющаяся стенка граничит с жидкостью, например, в циклически нагруженных подшипниках скольжения.

## **XIX. РЕГИСТРАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ**

Результаты визуального и измерительного контроля оформляются следующим образом.

1. Протокол измерения размеров.
2. Акт визуального и измерительного контроля.
3. Акт визуального и измерительного контроля качества сварных швов в процессе сварки соединения.
4. Журнал учета работ и регистрации результатов визуального и измерительного контроля.

В разных ведомствах это делается с учетом специфики производства.

Протокол размеров изделия (таблица) должен содержать фактические размеры изделия, выполненные в определенных сечениях, которые задаются «Схемой измерений \_\_\_\_\_»  
(изделие)

или «Программой технического диагностирования \_\_\_\_\_»  
(изделие)

Форма «Протокола размеров» определяется при проектно-технологической подготовке контрольных работ. Протокол подписывается лицами, выполнившими измерения с указанием фамилии, имени и отчества, а также руководителем работ по визуальному и измерительному контролю также с указанием фамилии, имени и отчества.

\_\_\_\_\_  
(предприятие, организация)

**Акт № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
визуального и измерительного контроля**

1. В соответствии с наряд-заказом (заявкой) \_\_\_\_\_  
(номер)  
выполнен \_\_\_\_\_ контроль  
(визуальный, измерительный)

\_\_\_\_\_  
(наименование и размеры контролируемого объекта, номер НТД, ТУ, чертежа,  
плавка (партия), номер объекта контроля)

Контроль выполнен согласно \_\_\_\_\_  
(наименование и/или шифр НТД)

2. При контроле выявлены следующие дефекты

\_\_\_\_\_  
(характеристика дефектов (форма, размеры, расположение или ориентация для конкретных  
объектов))

3. Заключение по результатам визуального и измерительного  
контроля \_\_\_\_\_

Контроль выполнил: \_\_\_\_\_  
(ф.и.о., подпись)

Руководитель работ по визуальному  
и измерительному контролю: \_\_\_\_\_  
(ф.и.о., подпись)

---

(предприятие, организация)

**Акт № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_  
визуального или измерительного контроля качества сварных  
швов в процессе сварки соединения**

---

(наименование изделия и номер соединения)

1. Настоящим актом удостоверяем факт выполнения сварщиком \_\_\_\_\_

(фамилия, и., о., клеймо)

соединения \_\_\_\_\_

(см. сварочный формуляр), выполненного \_\_\_\_\_

(указать способ сварки и

положение)

ними технологиями сварки \_\_\_\_\_

(указать шифр технологии)

и недоступного для контроля \_\_\_\_\_

(указать способ контроля, предписанный

конструкторской документацией)

2. При послойном визуальном и измерительном контроле с оценкой качества по нормам \_\_\_\_\_

(шифр или наименование НТД)

для категории \_\_\_\_\_ установлено, что сварное соединение признано годным и соответствует требованиям

\_\_\_\_\_ (указать НТД или конструкторскую документацию)

Контроль выполнил: \_\_\_\_\_  
(ф.и.о., подпись)

Руководитель работ по визуальному  
и измерительному контролю: \_\_\_\_\_

(ф.и.о., подпись)

Результаты контроля фиксируются в «Журнале учета работ», в котором указывают:

- наименование и вид контролируемого объекта, его номер или шифр;
- расположение, размеры контролируемых участков;
- условия проведения контроля;
- производственно-контрольный документ, его номер;
- метод оптического вида контроля объекта и примененные приборы;
- способ измерительного контроля и примененные приборы;
- обозначение стандарта или технических условий на материал и номер чертежа объекта;
- основные характеристики дефектов, выявленных при контроле);
- наименование нормативно-технической документации, согласно которой выполнена оценка качества.

### **Клеймение деталей, сборочных единиц и сварных соединений**

1. На деталях и готовых сварных соединениях изделий, подлежащих неразрушающему контролю, должны быть поставлены клейма (маркировка).

2. Способ клеймения (маркировки) деталей задавался производственно-технологической документацией.

3. Рекомендуется маркировать одним из следующих способов:

- краской;

- креплением в районе сварного шва бирки (таблички), изготовленной из металла или твердого картона по ГОСТ 20376-74.

4. При маркировке краской следует применять быстросохнущие эмали и краски НЦ-5123 по ГОСТ 7462, ПФ-115 по ГОСТ 6465, КО-811 красная ТУ 6-10-596-82 или другие аналогичные по свойствам быстросохнущие эмали и лаки. Высота букв (цифр) – 25...35 мм. Буквы и цифры наносить на изделие кистью с помощью трафарета.

5. С целью предотвращения деформации металла тонкостенных (до 5,5 мм) конструкций рекомендуется при клеймении ударным способом клейма проставлять на специальных бирках.

## **ХХ. МЕЖДУНАРОДНЫЕ И НАЦИОНАЛЬНЫЕ СТАНДАРТЫ ОБУЧЕНИЯ И СЕРТИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА**

### **Общие сведения**

Действующий европейский стандарт EN 473:2008 «Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала неразрушающего контроля. Основные принципы» положен в основу аналогичных национальных стандартов всех европейских стран, включая Россию и Украину. Этот стандарт излагается здесь в сокращенном виде, устанавливает систему квалификации и сертификации персонала, осуществляющего неразрушающий контроль промышленной продукции, по методам:

- акустико-эмиссионному (AT);
- вихретоковому (ET);
- контролю герметичности (исключая контроль вводов под давлением) (LT);
- магнитопорошковому (MT);
- капиллярному (PT);
- радиографическому (RT);
- ультразвуковому (UT);
- визуальному (VT).

Описанная в данном стандарте система может быть применена и к другим методам неразрушающего контроля при наличии соответствующей программы сертификации.

В стандарте EN-473 используются следующие понятия.

*Сертификация* – это процедура, используемая для установления правильности документов по обучению, аттестации и пр. для определения уровня квалификации по одному из методов, по одному из уровней и в одном из секторов с последующей выдачей сертификата соответствия.

*Сертифицирующий орган* выполняет сертификацию персонала неразрушающего контроля в соответствии с требованиями данного стандарта и стандарта EN 45013.

*Экзаменационный центр*, утвержденный сертифицирующим орга-

ном, проводит квалификационные экзамены.

*Сектор* – это емкое понятие. Это может быть определенная отрасль промышленности или техники, где используются особые технические приемы неразрушающего контроля, требующие специальных знаний, навыков, оборудования или образования.

Термин «Сектор» может относиться и к продукции (сварные соединения, отливки) или к отрасли промышленности (авиация, контроль в эксплуатации).

*Квалификационный экзамен*, на котором выявляются общие и специальные знания, проводят аттестационный орган.

*Общий экзамен* – это экзамен по основам определенного метода неразрушающего контроля.

*Специальный экзамен* – это экзамен по способам контроля, применяемым в определенном промышленном секторе, а также по знаниям контролируемой продукции и применяемых стандартов, технических условий и критериев приемки.

*Практический экзамен*: (уровни 1 и 2), на котором претендент демонстрирует знания необходимых устройств, а также умение выполнить контроль.

Практический экзамен на уровень 3, при котором претендент демонстрирует способность составлять методику по одному или нескольким методам неразрушающего контроля.

*Базовый экзамен* – это экзамен на уровень 3, на котором проверяют знания по материаловедению и технологии, знания систем сертификации и основных принципов всех методов неразрушающего контроля, как это требуется для специалистов уровня 2.

*Экзамен по основному методу неразрушающего контроля* на уровень 3 проверяет общие и специальные знания претендента по основному методу неразрушающего контроля и умение составлять методику выполнения конкретного контроля.

#### *Уровни квалификации.*

Уровень 1 присваивается претенденту, который доказал свою способность выполнять работу по контролю по инструкции под наблюдением специалиста 2 или 3 уровня.

Персоналу уровня 1 можно поручать:

- настраивать оборудование;
- выполнять неразрушающий контроль и оценивать его результаты на основе установленных критериев.

Персонал уровня 1 не несет ответственности ни за выбор применяемого метода или способа контроля, ни за точность оценки результатов контроля.

Уровень 2 присваивается претенденту, который доказал свою спо-

собность выполнять неразрушающий контроль по установленным или общепринятым инструкциям и руководить этим процессом.

Персоналу уровня 2 можно поручать работу из перечня, указанного в сертификате:

- выбирать способ контроля для выбранного физического метода контроля;
- ограничивать область применения метода контроля;
- использовать в инструкциях стандарты и технические условия по неразрушающему контролю;
- настраивать оборудование и проверять настройку;
- выполнять контроль и наблюдать за правильностью его выполнения;
- представлять результаты контроля и оценивать их в соответствии с применяемыми стандартами, другими нормативными материалами и техническими условиями;
- составлять письменные инструкции по контролю;
- выполнять все работы, которые выполняет оператор уровня 1;
- составлять отчет по результатам неразрушающего контроля.

Уровень 3. Претендент на 3 уровень должен уметь выполнять любую работу по неразрушающему контролю, по которой оно сертифицировано, в том числе:

- составлять инструкции по неразрушающему контролю и выполнять описания метода и решать вопросы внедрения;
- интерпретировать стандарты, нормы, технические условия и описания метода к конкретным условиям;
- выбирать специальные методы и способы неразрушающего контроля;
- выполнять все работы, которые выполняют контролеры уровня 1 и 2, и наблюдать за ними.

Персонал уровня 3 может, если он уполномочен сертифицирующим органом, проводить от его имени квалификационные экзамены и наблюдать за ними.

## **Допуск к сертификации**

Чтобы быть допущенным к сертификации, претендент должен успешно сдать квалификационный экзамен, иметь соответствующее образование, необходимый практический опыт в области неразрушающего контроля, удовлетворительное зрение. Претендент должен представить документ о завершении обучения, удовлетворяющего требованиям сертифицирующего органа по определенному методу и уровню, по которым он добивается сертификации.

В качестве руководства по таким требованиям могут быть исполь-

зованы Рекомендации Международного Комитета по неразрушающему контролю ICNT WH 16-85 – 21-85. Минимальный срок обучения для определенного метода неразрушающего контроля должен соответствовать табл. 41, а минимальный производственный стаж – табл. 42.

**Таблица 41. Требования к минимальным срокам обучения**

Метод неразрушающего контроля		Уровень 1	Уровень 2
	AT	40	60
	ET	40	40
LT	A – Основные сведения	8	16
	B – Методы измерения давления	14	28
	C – Метод пробного газа	18	36
	MT	16	24
	PT	16	24
	RT	40	80
	UT	40	80
	VT	16	24

**Таблица 49. Требования к минимальному производственному стажу**

Метод неразрушающего контроля		Стаж (мес)	
		Уровень 1	Уровень 2
	AT	6	12
	ET	3	9
LT	Общий стаж	3	9
	Стаж только по методу измерения давления	2	6
	Стаж только по методу пробного газа	2	6
	MT	1	3
	PT	1	3
	RT	3	9
	UT	3	9
	VT	1	3

Все претенденты на уровень 3 сертификации по какому-либо методу неразрушающего контроля должны успешно выдержать практический экзамен на уровень 2 по соответствующему промышленному сектору и методу контроля (с оценкой  $\geq 70\%$ ), за исключением составления инструкций по неразрушающему контролю для уровня 1. В табл. 43 представлен минимальный стаж в зависимости от общего образования претендента на уровень 3.

*Требования к состоянию здоровья* для всех уровней квалификации одинаковые. Претендент должен иметь документальное подтверждение удовлетворительного состояния своего зрения в соответствии со

следующими требованиями:

- острота ближнего зрения должна быть достаточной, чтобы прочитывать буквы Jaeger № 1 (или эквивалента) с расстояния не менее 30 см;
- цветовосприятие должно быть достаточным, чтобы распознавать цвета или различия.

**Таблица 43. Требования к минимальному стажу специалиста 3 уровня**

Вид допуска	Уровень общего образования	Стаж (мес)
Допуск на уровень 3 специалиста, ранее сертифицированного на уровень 2	Трехлетний курс в одном из научных или инженерных вузов или в университете	12
	Техникум или двухлетний курс в одном из научных или инженерных вузов или в университете	24
	При отсутствии вышеуказанной подготовки	48
Непосредственный допуск на уровень 3 после сдачи практического экзамена на уровень 2	Трехлетний курс в одном из научных или инженерных вузов или в университете	48
	Техникум или двухлетний курс в одном из научных или инженерных вузов или в университете	48
	При отсутствии вышеуказанной подготовки	72

### **Содержание и коэффициенты экзаменов для уровней 1 и 2**

*Общий* экзамен должен состоять только из вопросов, выбранных случайным образом из сборника вопросов, одобренных сертифицирующим органом. Претендент должен дать ответы, по меньшей мере, на количество вопросов, указанных в табл. 44.

**Таблица 44. Минимальное количество вопросов для общего экзамена**

Метод неразрушающего контроля	Количество вопросов	
	Уровень 1	Уровень 2
AT	40	40
ET	40	40
PT	30	30
LT	30	30
MT	30	30
RT	40	40
UT	40	40
VT	30	30

*Специальный* экзамен должен состоять только из вопросов, выбранных случайным образом из сборника вопросов, одобренных сер-

тифицирующим органом. Минимальное количество вопросов кандидату на специальном экзамене указано в табл. 45.

**Таблица 45. Минимальное количество вопросов специального экзамена**

Метод неразрушающего контроля		Уровень 1	Уровень 2
	AT	20	20
	ET	20	20
LT	Методы измерения давления	20	20
	Метод пробного газа	20	20
	MT	20	20
	PT	20	20
	RT	20	20
	UT	20	20
	VT	20	20

Если специальный экзамен проводится по двум или более промышленным секторам, то минимальное количество вопросов, равномерно распределенных по соответствующим секторам, должно равняться 30.

На практическом экзамене должно проверяться умение применять метод контроля на данном экзаменационном образце, регистрировать (а для претендентов уровня 2 оценить) информацию в необходимом размере, а также составлять отчет о результатах контроля в требуемой форме.

Экзаменационные образцы должны содержать характерные несплошности, которые появляются в объекте контроля в процессе производства или в результате действия нагрузок при эксплуатации.

Претендент на уровень 1 должен выполнять инструкцию по неразрушающему контролю, предоставленную экзаменатором.

Претендент на уровень 2 должен выбрать для применения способ неразрушающего контроля и, в зависимости от заданного стандарта, норм или технических условий, также определить условия выполнения контроля.

Претендент на уровень 2 должен составить, по меньшей мере, одну инструкцию по неразрушающему контролю для использования претендентом уровня 1. Рекомендуемое максимальное время, предоставляемое для этой части экзамена, равно двум часам.

Экзаменатор несет персональную ответственность за оценку результатов экзаменов. Общие, специальные и практические экзамены должны оцениваться раздельно.

Практический экзамен должен оцениваться в соответствии с табл. 46, где указаны максимально возможные баллы по отдельным процедурам практического экзамена.

**Таблица 46. Баллы практических знаний**

№ пп	Технологические операции обучения	Оценка (в баллах)			
		Макс.		Факт. по секторам	
		I	II		
1	Подбор и проверка работоспособности инструмента и принадлежностей для контроля	20	10		
2	Выбор параметров контроля	0	7		
3	Осмотр и разметка объекта контроля	5	3		
4	Измерение освещенности контролируемой поверхности	10	3		
5	Проведение визуального контроля	20	7		
6	Фиксация выявленных дефектов (координаты), определение их типа	15	15		
7	Измерение характеристик выявленных дефектов (геометрических размеров)	20	15		
8	Оценка качества объекта контроля	0	15		
9	Составление протокола контроля	10	10		
10	Разработка технологической карты контроля объекта	0	15		
<b>Всего баллов</b>		<b>100</b>	<b>100</b>		

Для сертификации претендент должен набрать на каждом экзамене не менее 70 % и в сумме не менее 80 %. Суммарный результат  $N$  должен рассчитываться по следующей формуле

$$N = 0,25n_g + 0,25n_s + 0,50n_p,$$

где  $n_g$  – оценка на общем экзамене;  $n_s$  – оценка на специальном экзамене;  $n_p$  – оценка на практическом экзамене.

### **Содержание экзамена и оценка знаний для третьего уровня квалификации**

На базовом письменном экзамене должны оцениваться знания претендента по вопросам, количество которых приведено в табл. 47.

Экзамен по основному методу должен оценивать знания претендента по методу, на который готовится специалист, исходя из указанного в табл. 48 требуемого минимального количества экзаменацион-

ных вопросов.

**Таблица 47. Требуемое минимальное количество вопросов на базовом экзамене**

Часть	Тема	Количество вопросов
A <sub>1</sub>	Технические знания по материаловедению и технологии	25
A <sub>2</sub>	Знания системы квалификации и сертификации сертифицирующего органа, основанной на данном стандарте	10
B	Общие знания четырех методов неразрушающего контроля по выбору претендента. По меньшей мере, один из четырех методов должен быть ультразвуковым или радиографическим. Вопросы (15 по каждому из четырех методов) используются из базы общего экзамена для II уровня	15 для каждого метода (в сумме 60)

**Таблица 48. Минимальное количество вопросов по основному методу**

Часть	Тема	Количество вопросов
C <sub>1</sub>	Знания по уровню 3 по выбранному методу контроля	30
C <sub>2</sub>	Применение метода неразрушающего контроля по соответствующему промышленному сектору, включая используемые стандарты, нормы и технические условия	20

Претенденты на уровень 3, исключая имеющих сертификат уровня 2 по любому методу, должны сдать соответствующий практический экзамен по уровню 2.

Экзамены по базовым знаниям и по основному методу должны оцениваться раздельно. Для того, чтобы быть сертифицированным, претендент должен сдать оба экзамена – базовый и по основному методу.

*Базовый экзамен* дает

$$\text{общую оценку } N_B = 0,5n_a + 0,5n_b,$$

где  $n_a$  – оценка частей A<sub>1</sub> и A<sub>2</sub>;  $n_b$  – оценка части B (см. табл. 47).

Для успешной сдачи этого экзамена претендент должен набрать не менее 70 % и получить общую оценку  $N_B$  не менее 80 %.

*Экзамен по основному методу* включает следующие подсчеты:

а) общая оценка  $N_C$  на экзамене по основному методу должна рассчитываться по следующей формуле:

$$N_C = (n_{c1} + n_{c2} + n_{c3}) / 3,$$

где  $n_{c1}$  – оценка части  $C_1$ ;  $n_{c2}$  – оценка части  $C_2$ ;  $n_{c3}$  – оценка части  $C_3$ ;

б) для успешной сдачи этого экзамена претендент должен в каждой части получить не менее 70 % и общую оценку  $N_C$  не менее 80 %.

Экзамены на уровень 3 должны проводиться и оцениваться не менее, чем двумя экзаменаторами.

Претендент, не сдавший экзамен, должен ожидать переэкзаменовки не менее 12 мес.

Претендент, не получивший оценки, необходимой для сертификации, может один раз повторно пройти экзамен по каждой части (общей, специальной или практической) не ранее, чем через 1 мес. и не позже, чем через 12 мес. Если претендент прошел дополнительное обучение, что одобрено сертифицирующим органом, то переэкзаменовка может быть проведена после этого обучения.

Претенденту, выполнившему все выше приведенные условия, выдается сертификат или соответствующее удостоверение, максимальный срок действия которого должен составлять пять лет.

После окончания первого срока действия и десяти последующих лет сертификат может быть продлен сертифицирующим органом на следующие пять лет.

## **XXI. ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО ВИЗУАЛЬНОМУ И ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ**

### **1. Общетехнический курс для предприятия энергетического комплекса**

*Тема 1.* Назначение и классификация трубопроводов. Группы оборудования и трубопроводов АЭС; категории сварных соединений. Категории трубопроводов пара и горячей воды. Изготовление, укрупнение и монтаж трубопроводов, конструкций и технологического оборудования.

*Тема 2.* Материаловедение. Общие сведения о металлах, сплавах и их свойствах. Разновидности сталей, их характеристики, понятие о микро- и макроструктуре, связь между структурой и свойствами стали. Технологические особенности различных марок сталей и области их применения. Стали и сплавы. Влияние физических и механических свойств стали (сплава) на выбор метода неразрушающего контроля.

*Тема 3.* Основные понятия о разрушающих методах контроля металлов и сплавов; методы разрушающего контроля и области их применения.

*Тема 4.* Общие сведения о сварке и термообработке сварных соединений. Способы сварки, применяемые при изготовлении, монтаже и ремонте оборудования. Сварочные материалы и области их применения. Термическая обработка сварных соединений изделий и ее назначение. Влияние термической обработки на свойства сварных соединений.

*Тема 5.* Виды сварных соединений трубопроводов; требования к конструкционным формам сварных соединений. Основные зоны сварного соединения: металл шва, зона сплавления, зона термического влияния и основной металл. Влияние конструкционных особенностей сварного соединения и металла изделия на выбор методов визуального контроля.

*Тема 6.* Типы несплошностей сварных соединений и основного металла. Понятия – несплошность и дефект. Классификация дефектов сварных соединений и основного металла изделий. Наружные и

внутренние дефекты. Плоскостные и объемные дефекты. Виды дефектов.

*Тема 7.* Причины возникновения дефектов в сварных соединениях и основном металле изделий; характерные виды дефектов присущих различным способам сварки. Влияние дефектов на свойства и технологическую прочность основного металла и сварных соединений.

*Тема 8.* Общие требования к качеству сварного соединения и основного металла. Входной контроль качества основных и сварочных металлов.

*Тема 9.* Требования к контролю процесса подготовки, сборки, сварки по исправлению дефектов. Технические требования к конструкционным формам и расположению сварных соединений на изделии. Приемочный контроль качества сварных соединений.

*Тема 10.* Требования НТД к качеству сварных соединений изделий различных ведомств.

*Тема 11.* Методы контроля сварных соединений (наплавок) и основного металла изделий неразрушающими методами контроля. Области их применения и физическая сущность. Визуальный и измерительный контроль сварных соединений (наплавок) и основного металла изделий. Неразрушающие методы контроля: капиллярный, магнитопорошковый, ультразвуковой, радиографический и герметичности (газовые и жидкостные).

*Тема 12.* Общие сведения о разрушающих методах контроля сварных соединений. Преимущества и недостатки неразрушающих методов контроля. Комплексное использование методов контроля сварных соединений (наплавок) и основного металла изделий.

*Тема 13.* Основные требования нормативно-технической и технологической документации.

*Тема 14.* Физические основы визуального и измерительного контроля. Оптика глаза. Бинокулярное зрение. Стереоскопический эффект. Видимость объекта контроля. Контрастная чувствительность. Разрешающая способность и острота зрения. Цветоощущение. Колориметрическая характеристика цвета. Временные характеристики зрения.

*Тема 15.* Методика визуального и измерительного контроля. Визуальный и измерительный контроль качества полуфабрикатов (труба, лист, профильный прокат) и заготовок (поковки). Параметры полуфабрикатов и заготовок, контролируемые визуально и измерением при входном контроле.

*Тема 16.* Визуальный и измерительный контроль конструкционных элементов, подготовленных под сварку деталей. Основные конструкционные размеры стыковых, тавровых, нахлесточных, угловых и торцевых

сварных соединений труб и листов, и способы их измерения. Остающиеся стальные подкладки и расплавляемые проволочные вставки, их формы и размеры. Визуальный и измерительный контроль качества сборки под сварку торцевых соединений труб, контролируемые параметры, их размеры и способы измерения.

*Тема 17.* Визуальный и измерительный контроль качества сборки под сварку стыковых соединений деталей трубопроводов, контролируемые параметры и их размеры. Измерительный контроль смещения кромок деталей трубопроводов с внутренней стороны, основные способы измерения. Визуальный и измерительный контроль качества сборки под сварку угловых, тавровых и нахлесточных соединений деталей конструкций (баков, сосудов, коробов и пр.); контролируемые параметры, их размеры и способы измерения. Визуальный и измерительный контроль качества сборки под сварку соединений штуцеров для ответвления трубопроводов, контролируемые параметры, их размеры и способы измерения.

*Тема 18.* Визуальный и измерительный контроль конструкционных размеров шва угловых, тавровых и нахлесточных соединений, соединений вварки штуцеров в оборудование и трубопроводы; способы измерения.

*Тема 19.* Визуальный и измерительный контроль размеров вогнутости (вогнутого мениска) и выпуклости обратной стороны шва соединений трубопроводов и листовых конструкций, свариваемых с одной стороны; размеры контролируемых параметров и способы их измерения. Измерительный контроль стыковых, угловых, тавровых, нахлесточных и торцевых сварных соединений в процессе сварки; порядок контроля, контролируемые параметры и способы их измерения. Измерительный контроль перелома осей свариваемых деталей трубопроводов, размеры перелома осей; способы определения величины перелома в стыковых и угловых соединениях.

*Тема 20.* Измерительный контроль местной деформации соединений листовых конструкций (баков, сосудов, коробов и пр.); допустимые размеры местной деформации; способы измерения выборок дефектных мест в сварных соединениях; контролируемые параметры и способы их измерения.

*Тема 21.* Оценка высоты (глубины) углублений между валиками и чешуйчатости поверхности валика согласно нормам и др. документов; способы измерения.

*Тема 22.* Оценка размеров одиночных поверхностных дефектов сварного шва согласно нормам; способы измерения. Оценка разности высоты усиления по длине (периметру) шва.

*Тема 23.* Оценка шероховатости по образцам шероховатости и с

помощью профилографа-профилометра или других приборов. Оценка качества подготовки поверхности шва и прилегающих поверхностей металла под капиллярный, ультразвуковой и магнитопорошковый контроль.

*Тема 24.* Приборы и инструменты для визуального и измерительного контроля. Классификация приборов для визуального и измерительного контроля. Приборы для визуально-оптического контроля мелких, близко расположенных дефектов и поверхностей (лупы, микроскопы). Обзорные складные, карманные и телескопические лупы. Их технические характеристики и конструктивные особенности. Погрешность измерения. Приборы для визуально-оптического контроля удаленных и скрытых поверхностей (гибкие эндоскопы, перископы). Увеличение этих приборов. Жесткие эндоскопы и перископы. Назначение, типы, технические характеристики и конструктивные особенности. Погрешность измерения, выявляемые дефекты. Инструменты для измерительного контроля линейных величин (штангенциркули, щупы, шаблоны, микрометры, нутромеры, линейки). Погрешность измерения. Инструменты для измерительного контроля угловых величин (шаблоны, угломеры). Погрешность измерения. Приборы для измерения толщины стенок деталей и сборочных единиц физическими методами (толщиномеры). Приборы, эталоны и образцы для оценки шероховатости контролируемых поверхностей.

*Тема 25.* Органы государственного надзора и ведомственного контроля за средствами контроля и измерений. Порядок организации метрологической поверки приборов и инструментов. Государственные и ведомственные метрологические службы. Порядок метрологической аттестации приборов и инструментов для визуального и измерительного контроля, в т.ч. не стандартизованных средств контроля. Метрологические службы и центры.

*Тема 26.* Нормы оценки качества сварных соединений и основного металла. Нормы оценки качества стыковых, угловых, тавровых, нахлесточных и торцевых соединений и наплавок оборудования и трубопроводов при оценке качества сварных соединений и наплавок. Нормы оценки качества полуфабрикатов и заготовок, изложенные в стандартах и технических условиях на поставку.

*Тема 27.* Оформление и хранение отчетной документации. Отчетная документация по визуальному и измерительному контролю. Требования к оформлению. Сроки хранения документации.

*Тема 28.* Организация работ по визуальному и измерительному контролю. Организация службы (подразделения) контроля на предприятии. Основные функции службы контроля. Требования к контролерам, допускаемым к проведению работ. Квалификация. Порядок ат-

тестации и переаттестации. Срок действия аттестации. Организация освещения объекта контроля. Оценка освещенности контролируемых поверхностей по ГОСТ 23479-79 и унифицированной методике. Нормы освещенности.

**Тема 29.** Требования безопасности. Общие требования безопасности на производстве. Основные положения ГОСТ 12.3.002-75. Мероприятия по пожарной безопасности согласно ГОСТ 12.1.004-91. Техника безопасности в строительстве согласно СНиП III-4-80, ГОСТ 12.1.013-78. Организация работ по технике безопасности на предприятии. Порядок допуска исполнителей к выполнению работ.

## **2. Европейские правила подготовки операторов по визуальному контролю**

Визуальный и визуально-измерительный контроль – это первые процедуры, применяемые во всех европейских странах, в ряду технологических процедур контроля любой ответственной детали.

Международная организация неразрушающего контроля ICNDT разработала рекомендации WH 24-00 к техническим знаниям персонала, выполняющего визуальный контроль (табл. 49).

**Таблица 49. Требования к продолжительности подготовки (обучения) персонала визуального контроля ICNDT и EN 473**

№ пп	Наименование темы	Уровень 1, %	Уровень 2, %
1	Принципы визуального контроля	14	6
2	Способы контроля	20	22
3	Характеристики контроля и область его применения	12	10
4	Визуальный контроль в процессе изготовления изделий	40	8
5	Эксплуатационный визуальный контроль, техническое обслуживание	–	30
6	Стандарты, процедуры, инструкции неразрушающего контроля	10	15
7	Другие способы и методы неразрушающего контроля	–	5
8	Безопасность и защита окружающей среды, квалификация и аттестация специалистов	4	4
	Всего	100	100

Длительность подготовки в соответствии с требованиями EN 473 для 1 и 2 уровня квалификации составляют 16 и 24 ч.

Рекомендации подготовлены Немецким обществом DGZfP в 2000 г. и приняты на заседании комиссии ICNDT.

### 3. Программы подготовки по ICNDT и EN 473 на разные уровни квалификации

Уровень 1	Уровень 2 (дополнительно к программе уровня 1)	Уровень 3 (дополнительно к программам уровней 1 и 2)
1	2	3
1.1. Введение. Область применения и цель визуального контроля	1.1. Обзор. Применения визуального контроля	1.1. Роль, важность и порядок проведения визуального контроля
1.2. Физические принципы. Свет, освещение. Оптические принципы. Отражение, отражательная способность	1.2. Спектр света, цвет. Освещенность, измерение. Направленное и рассеянное отражение, поглощение	1.2. Яркость, измерение. Контраст; факторы, влияющие на контраст. Геометрическая оптика. Дисторсия. Измерения
1.3. Физиологические факторы. Глаз, его строение, зрительные функции	1.3. Острота зрения, угол зрения, поле зрения	1.3. Характеристика зрения; проверка зрения
2.1. Подготовка контролируемых поверхностей	2.1. Выбор подходящих методов подготовки контролируемых поверхностей	2.1. Рассмотрение характерных требований к состоянию поверхности
2.2. Установка надлежащего освещения и измерение освещенности	2.2. Выбор осветительных устройств и уровней освещенности	2.2. Определение требований по освещенности в особых случаях
2.3. Обеспечение предписанных условий наблюдения и процедур	2.3. Выбор условий наблюдения и способов выявления дефектов. Ослепляющий блеск	2.3. Указания об установке надлежащих условий наблюдения
2.4. Обращение с оборудованием: - датчики и измерительные приборы; - увеличители и микроскопы; - источники света, световоды зеркала	2.4. Выбор и применение способов в соответствии с конкретной задачей контроля и определение контролируемой области. Определение параметров для обычных задач	2.4. Определение надлежащих методов, способов и параметров для решения характерных и специальных задач

*Продолжение*

1	2	3
2.5. Эндоскопы. Дистанционный визуальный контроль. Общие сведения	2.5. Эндоскопы. 2.5.1. Жесткие эндоскопы (бороископы). 2.5.2. Гибкие эндоскопы (волоконные эндоскопы). 2.5.3. Видеоскопы. Видеотехнология. Выбор оборудования. Выполнение контроля. Методы оценки размера дефектов	2.5. Указания о выборе оборудования контроля, процедур, проверках, отчетах и используемой документации
3.1. Обычный визуальный контроль: проверка общих условий. Первонаучальные сведения о контролируемом изделии, например, его идентификация, установка	3.1. Составление соответствующих характеристик контроля и создание процедур для выявления дефектов	3.1. Оценка важности признаков выявляемых дефектов
3.2. Специальный визуальный контроль: контроль специальных параметров, требующий повышенного уровня освещенности и особого оборудования, например, отклонений формы, текстуры поверхности, дефекты	3.2. Описание контролируемых параметров, условий контроля для их выявления, классификация, оценка и документирование	3.2. Значение контролируемых параметров и суждение о них с учетом пригодности изделия для выполнения задач, для которых оно предназначено
4.1. Технология изготовления и материалы. Дефекты, их вид, места, где они встречаются	4.1. Углубленные знания о контролируемых изделиях. Распознавание индикаций. Составление проектов каталогов и дефектов	4.1. Знания и опыт работы с материалами и изделиями
4.2. Выполнение контроля по инструкции	4.2. Составление инструкций по контролю в соответствии с применяемыми стандартами	4.2. Подготовка письменных процедур, описание способов контроля и условий контроля
4.3. Составление записей и классификация результатов в соответствии с письменными критериями. Составление отчета	4.3. Оценка дефектов в соответствии с регламентирующими документами и процедурами неразрушающего контроля	4.3. Помощь и советы при составлении проекта приемки

*Продолжение*

1	2	3
	Возможные отрасли промышленности: нефтехимические и промышленные предприятия, железные дороги и др.	Контроль сосудов и устройств, работающих под давлением, и их деталей в период эксплуатации
	5.1. Рабочие условия; дефекты, возникающие при эксплуатации. Внешний вид повреждений и поломок	5.1. Технология изготовления и вид дефектов. Статистика. Характерные дефекты при эксплуатации. Связь с заинтересованными сторонами
	5.2. Планирование и составление отчета о контроле, оценка результатов	5.2. При необходимости выдача указаний о выполнении особых способов контроля и дальнейших исследований. Создание и внедрение способов и процедур контроля
Работа с применяемыми стандартами или инструкциями под наблюдением другого специалиста	Составление инструкций по контролю в соответствии с требованиями стандартов, применимых к фактическим рабочим условиям. Описание действий, выполняемых при проведении контроля	Составление процедур визуального контроля. Применяемые технические регламентирующие документы. Описание параметров, учитываемых при визуальном контроле
	Методы контроля поверхностей	Технология машинного зрения. Термография. Обработка изображения. Анализ поломок
	Безопасность и защита окружающей среды	Обучение, аттестация

## **ХХII. ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ К ОБЩЕМУ ЭКЗАМЕНУ НА УРОВЕНЬ 2 КВАЛИФИКАЦИИ ПО ВИЗУАЛЬНО- ИЗМЕРИТЕЛЬНОМУ КОНТРОЛЮ**

- 1.** Основной европейский стандарт, определяющий правила аттестации и сертификации персонала по неразрушающему контролю:  
1) EN 2115-2001; 2) EN 473-2000; 3) ИСО-901-2003; 4) ASNT 7310.
- 2.** Какие дефекты стали являются дефектами сварных соединений:  
1) усадочная раковина; 2) ликвация; 3) подрез; 4) пузьри, поры.
- 3.** Какие из перечисленных дефектов стали являются поверхностными:  
1) непровары; 2) межкристаллитные трещины; 3) неоднородности травления; 4) точечно-пятнистая неоднородность.
- 4.** Какие из перечисленных дефектов являются результатом растягивающих усилий внутри металла:  
1) волосовины; 2) закаты; 3) шлифовочные трещины; 4) травильные трещины.
- 5.** Какие из перечисленных дефектов стали обнаруживаются при визуальном контроле:  
1) закат; 2) подрез; 3) рванины; 4) рябизна; 5) закаты.
- 6.** Какие из перечисленных дефектов являются результатом газовыделения в жидком металле:  
1) полосчатость структурная; 2) внутренние, подкорковые, поверхностные пузьри; 3) поры; 4) раковины.
- 7.** Какие из трещин определяются только визуальным контролем:  
1) в корне сварного шва; 2) шлифовочные; 3) закалочные; 4) межслойные при многопроходной сварке.
- 8.** Какие физические методы предназначены для определения поверхностных дефектов:  
1) капиллярная дефектоскопия; 2) магнитопорошковый метод; 3) томография ультразвуковая; 4) радиоскопия.
- 9.** Эталонные образцы предназначены для:  
1) сравнения разных методов контроля; 2) настройки аппаратуры; 3) определения достоверности контроля; 4) определения чувствительности.
- 10.** Какой из методов неразрушающего контроля наиболее чувствителен для нахождения трещин, глубина которых менее 0,5 мм:  
1) радиография; 2) визуально-оптический; 3) ультразвуковая дефектоскопия; 4) капиллярная дефектоскопия.

**11. Контраст:**

1) степень различимости объектов при их наблюдении; 2) свойство объекта выделяться на окружающем фоне; 3) объемное восприятие объекта; 4) яркость объекта.

**12. К оборудованию, применяемому при визуальном контроле, относятся:**

1) эндоскопы; 2) лупы; 3) денситометры; 4) ответы 1) и 2).

**13. Для визуального контроля внутренних поверхностей используются:**

1) эндоскопы; 2) перископы; 3) микроскопы; 4) ответы 1) и 2).

**14. Визуально-оптический контроль включает в себя:**

1) визуальное наблюдение объекта контроля; 2) измерение параметров выявленных несплошностей; 3) измерение подготовленных под сварку элементов и формы шва; 4) ответы 1), 2), 3).

**15. Визуальный контроль наружных поверхностей проводится:**

1) невооруженным глазом; 2) с применением эндоскопов; 3) с применением луп увеличением до 10 крат; 4) ответы 1) и 3).

**16. Сплошной неразрушающий контроль:**

1) контроль отдельных участков конструкции; 2) контроль, проводимый по всей протяженности каждого сварного соединения или по всей площади наплавленной поверхности каждой детали; 3) контроль, проводимый в объеме 25 %; 4) контроль наиболее ответственных узлов конструкции, осуществляемый на стадии эксплуатации изделия.

**17. Выборочный контроль:**

1) контроль, проводимый по всей поверхности сварного соединения; 2) контроль продукции поставщика; 3) контроль, при котором подвергаются проверке отдельные участки сварных соединений или отдельные сварные соединения (наплавленные детали); 4) контроль наиболее ответственных узлов конструкции.

**18. Визуально-оптический контроль:**

1) разрушающий метод контроля; 2) органолептический метод контроля; 3) осмотр и измерение выявленных несплошностей; 4) ответ 2) и 3).

**19. При формировании визуального образа важное значение имеет:**

1) освещение; 2) достраивание образа; 3) гистерезис распознавания; 4) оптические инструменты.

**20. Световые приборы, как правило, испускают:**

1) монохроматическое излучение; 2) излучение с прерывистым спектром; 3) излучение, имеющее непрерывный спектр; 4) ответы 1) и 2).

**21. Подготовка контролируемого объекта к визуальному контролю включает:**

1) удаление загрязнений, мешающих проведению контроля; 2) определение границ контроля; 3) определение (уточнение) характера дефектов; 4) все перечисленное выше.

**22. Общее освещение:**

1) освещение объекта контроля; 2) такое расположение светильников,

при котором они создают равномерную освещенность во всех точках производственного помещения; 3) наличие определенного количества светильников в рабочем помещении; 4) равномерное освещение контролируемой поверхности.

**23. Комбинированное освещение:**

1) общая освещенность объекта контроля; 2) наличие определенного количества светильников в рабочем помещении; 3) такое расположение светильников, при котором на рабочих местах есть местное освещение, а по всей площади помещение общее; 4) равномерное освещение контролируемой поверхности.

**24. Местное освещение:**

1) равномерное освещение контролируемой поверхности; 2) организация освещения, при которой светильники расположены только на рабочем месте; 3) наличие определенного количества светильников в рабочем помещении; 4) общая освещенность помещения.

**25. К методам неразрушающего контроля сварных соединений относятся:**

- 1) визуально-оптический;
- 2) радиографический;
- 3) ультразвуковой;
- 4) все перечисленное выше.

**26. Что такое бинокулярное зрение:**

1) способность человека воспринимать рассматриваемый предмет одновременно обоими глазами; 2) зрение, при котором используются оптические средства; 3) объемное восприятие объектов; 4) ответы 2) и 3).

**27. Что такое стереоскопический эффект:**

1) объемное восприятие объектов; 2) способность человека воспринимать предмет одновременно двумя глазами; 3) боковое зрение; 4) зрение, при котором используются оптические средства.

**28. Расстояние наилучшего зрения:**

- 1) 250 мм;
- 2) 300 мм;
- 3) 200 мм;
- 4) 350 мм.

**29. Видимость:**

1) степень различимости объектов при их наблюдении; 2) расстояние наилучшего зрения; 3) объемное восприятие объекта; 4) контрастность предмета.

**30. Видимость зависит от:**

1) контраста; 2) яркости; 3) условий освещенности; 4) всех перечисленных факторов.

**31. Визуально-оптический контроль выполняется с целью:**

1) выявления поверхностных трещин, расслоений, закатов, забоин, раковин, плен, включений и других несплошностей в заготовках; 2) проверки соответствия подготовки под сварку деталей требованиям нормативной документации; 3) выявления поверхностных трещин, кратеров, подрезов, прожогов и других несплошностей в сварных швах и околошовной зоне; 4) все перечисленное выше.

**32. Разрешающая способность глаза:**

1) способность различать близко расположенные дефекты; 2) способность глаза замечать мелкие «детали» или различать их форму; 3) способность глаза различать цвета; 4) способность глаза адаптироваться к изменению освещенности.

**33.** Освещенность контролируемых поверхностей при визуальном контроле должна быть не менее:

- 1) 1250 люкс; 2) 300 люкс; 3) 500 люкс; 4) 1000 люкс.

**34.** Единицы измерения освещенности:

- 1) кандела; 2) люмен; 3) люкс; 4) нит.

**35. Брак:**

1) продукция, передача которой потребителю не допускается; 2) каждое отдельное несоответствие требованиям нормативной документации; 3) конкретное недопустимое изменение в продукции; 4) нарушение работоспособности изделия.

**36.** По оценке степени влияния на эффективность и безопасность использования продукции с учетом ее назначения дефекты подразделяются на:

1) критические, значительные и малозначительные; 2) устранимые и неустранимые; 3) явные и скрытые; 4) настоящие и ложные.

**37. Дефект:**

1) каждое отдельное несоответствие продукции требованиям нормативной документации; 2) неисправное состояние деталей; 3) нарушение работоспособности изделия; 4) ответы 2) и 3).

**38. Острота зрения – это:**

1) способность различать близко расположенные дефекты; 2) способность глаза замечать мелкие «детали» или различать их форму; 3) способность глаза различать цвета; 4) способность глаза адаптироваться к изменению освещенности.

**39. Какие из перечисленных ниже дефектов являются поверхностными:**

1) непровар; 2) следы возбуждения и окончания дугового процесса; 3) подрез; 4) смещение оси шва.

**40. Квалификация персонала:**

1) отзыв о способностях персонала, его деловых и других качествах; 2) наличие подготовки, профессиональных знаний, навыков и опыта, а также соответствующего состояния здоровья, которые дают возможность персоналу надлежащим образом осуществлять контроль; 3) процедура, используемая для установления уровня квалификации; 4) ответы 1) и 3).

**41. Кандидат на аттестацию по неразрушающему контролю – это:**

1) специалист, работающий в области неразрушающего контроля, имеющий определенный стаж и документ, удостоверяющий его квалификацию; 2) лицо, заявившее о желании получить квалификацию и пройти аттестацию в установленном порядке; 3) любой специалист, работающий в области неразрушающего контроля и не имеющий удостоверения установленного образца; 4) технический эксперт.

**42. Сталь:**

1) сплав железа, содержащий 2 % углерода, кремний, марганец, фосфор, серу; 2) сплав железа, содержащий 0,1...2 % углерода и небольшие количества кремния, марганца, фосфора, серы; 3) сплав железа, содержащий до 1 % углерода, кремний, марганец, фосфор, серу; 4) сплав железа, содержащий более 1,7 % углерода, а также кремний, марганец, небольшие количества серы и фосфора.

**43.** К нержавеющим сталим относятся:

- 1) 08Х18Н9Т; 2) 12Х2НМФА; 3) 08Х13; 4) ответы 1) и 3).

**44.** Вид сварки, дающей сварной шов без изменений его химического состава:

- 1) электрошлаковая; 2) газовая; 3) контактная; 4) аргонодуговая.

**45.** Вид термообработки, относящийся к упрочняющей термообработке, это:

- 1) нормализация; 2) отпуск; 3) закалка; 4) отжиг.

**46.** Чугун:

1) сплав железа, содержащий более 2 % углерода, а также кремний, марганец, небольшие количества серы и фосфора; 2) сплав железа, содержащий менее 1,7 % углерода; 3) сплав железа, содержащий 1,7 % углерода, до 1 % кремния, до 2 % марганца; 4) сплав железа, содержащий до 2 % углерода, а также хром, никель.

**47.** Как правило, характер отражения света от поверхностей объекта контроля можно оценить как:

- 1) зеркальный; 2) направленно-рассеянный; 3) диффузный; 4) ответ 1) или 3).

**48.** При сварке к образованию трещин приводит повышенное содержание:

- 1) марганца; 2) фосфора; 3) серы; 4) ответы 2) и 3).

**49.** Основные способы контактной сварки:

- 1) точечная; 2) стыковая; 3) шовная; 4) все перечисленные выше.

**50.** Коэффициент отражения света от металлов зависит от:

1) электропроводности металла; 2) состояния его поверхности; 3) частоты света; 4) всего перечисленного выше.

**51.** К основным характеристикам оптической аппаратуры относятся:

1) разрешающая способность; 2) увеличение; 3) поле зрения; 4) все перечисленное выше.

**52.** По принципу действия сканирующие устройства бывают:

1) оптико-механические; 2) полупроводниковые; 3) фотоэлектронные; 4) все перечисленные выше.

**53.** При выборе персонала для проведения визуально-оптического контроля учитываются следующие критерии:

1) теоретические знания и опыт; 2) общие и специфические физические способности и психологическая характеристика; 3) экономические факторы; 4) все перечисленное выше.

**54.** Ослепление дефектоскописта, вызванное блеском контролируемой

поверхности, устраняется:

- 1) затемненными стеклами; 2) поляризованными стеклами; 3) апелативическими стеклами; 4) ответы 1) и 3).

**55.** В случае обнаружения дефектов при выборочном 50 %-ном визуальном контроле проводят:

- 1) сплошной контроль; 2) применяют другие методы контроля; 3) деталь бракуют; 4) бракуют однотипные детали, выполненные сварщиком, допустившим дефекты.

**56.** Дефекты, характерные для цельнокатаных труб:

- 1) кратеры; 2) закаты, волосовины; 3) надрывы; 4) ответы 2) и 3).

**57.** Цвета разделяются на:

- 1) хроматические; 2) ахроматические; 3) полутона; 4) ответы 1) и 2).

**58.** К ахроматическим цветам относятся:

- 1) красный; 2) черный, серый; 3) белый; 4) ответы 2) и 3).

**59.** Визуально-оптический контроль на этапе технического диагностирования – это:

- 1) определение технического состояния объекта; 2) определение работоспособности объекта; 3) визуальное наблюдение объекта с целью обнаружения эксплуатационных дефектов металла; 4) оценка работоспособности с помощью неразрушающих методов контроля.

**60.** Стыковое сварное соединение – это соединение, в котором свариваемые элементы примыкают один к другому:

- 1) торцевыми поверхностями; 2) боковыми поверхностями; 3) под углом 90 градусов; 4) плоскостями.

**61.** При визуальном контроле сварных соединений используются:

- 1) калибры; 2) эталоны; 3) эталон сварщика; 4) лупы.

**62.** Какая из перечисленных несплошностей может быть обнаружена в сварном соединении при визуально-оптическом контроле:

- 1) расслоение; 2) прожог; 3) непровар; 4) складки.

**63.** Какая из перечисленных несплошностей может быть обнаружена в прокатном листе при визуально-оптическом контроле:

- 1) расслоение; 2) усадочная раковина; 3) непровар; 4) подрез.

**64.** От каких из приведенных ниже факторов зависит эффективность визуального контроля:

- 1) от осведомленности о возможных причинах возникновения дефектов; 2) от осведомленности о способах применения изделия; 3) предварительной очистки и условий окружающей среды, таких как температура и шум; 4) от всего приведенного выше.

**65.** Какая из несплошностей может быть обнаружена в прокатном металле:

- 1) флокен; 2) свищ; 3) усадочная раковина; 4) расслоение.

**66.** Какую несплошность можно классифицировать как эксплуатационную:

- 1) пористость; 2) усталостная трещина; 3) коррозионное поражение;

4) ответы 2) и 3).

**67.** Адаптация – это способность глаза:

1) изменять световую чувствительность глаза; 2) изменять порог контрастности глаза; 3) изменять разрешающую способность глаза; 4) приспосабливаться к различным условиям освещения.

**68.** В каком случае магнитопорошковый метод контроля является более эффективным, чем капиллярный:

1) контроль подповерхностных несплошностей в латунной детали; 2) контроль подповерхностных несплошностей алюминиевой штамповки; 3) контроль подповерхностных несплошностей в стальных заготовках; 4) при контроле деталей из высоколегированных сплавов с покрытием.

**69.** Каким методом неразрушающего контроля можно выявлять внутренние дефекты при одностороннем подходе:

1) магнитопорошковым; 2) радиографическим; 3) ультразвуковым; 4) всеми перечисленными.

**70.** Какой метод неразрушающего контроля дает объективный документ по качеству проконтролированного объекта:

1) капиллярный; 2) радиографический; 3) ультразвуковой; 4) магнитопорошковый.

**71.** Нормативная документация:

1) совокупность требований к продукции; 2) правила, отраслевые и государственные стандарты, ТУ, руководящие материалы, производственно-контрольная документация на изготовление, ремонт, техническое диагностирование; 3) совокупность требований по эксплуатации объектов; 4) документация определенной отрасли.

**72.** Неустранимый дефект:

1) трещина; 2) дефект, устранение которого технически невозможно; 3) дефект, устранение которого экономически нецелесообразно; 4) ответы 2) и 3).

**73.** Какая несплошность двухстороннего сварного соединения не может быть обнаружена при визуально-оптическом контроле:

1) чрезмерное усиление шва; 2) незаплавленный кратер; 3) непровар корня; 4) грубая чешуйчатость.

**74.** По происхождению дефекты подразделяются на:

1) критические и малозначительные; 2) производственные и эксплуатационные; 3) явные и скрытые; 4) настоящие и ложные.

**75.** По технологическому признаку сварка – это процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их:

1) местном нагреве; 2) пластической деформации; 3) совместном действии местного нагрева и пластического деформирования; 4) ответы 1), 2), 3).

**76.** Какой элемент глаза функционирует аналогично фотографической пластиинке фотоаппарата:

1) зрительный нерв; 2) радужная оболочка; 3) роговая оболочка;

4) сетчатка.

**77.** К низкоуглеродистым сталим относятся стали с содержанием:

1) углерода до 0,25 %; 2) легирующих элементов до 2 %; 3) одного легирующего элемента в пределах 2...5 %; 4) углерода выше 1 %.

**78.** В зависимости от содержания углерода стали делятся на:

1) качественные и обыкновенные; 2) среднеуглеродистые и низкоуглеродистые; 3) высокоуглеродистые; 4) ответы 2) и 3).

**79.** К элементам, ухудшающим свойства наплавленного металла, относятся:

1) водород; 2) кислород; 3) сера; 4) все перечисленные выше.

**80.** Склонность к хрупкому разрушению возрастает с увеличением:

1) остроты дефектов; 2) размеров дефектов; 3) размеров изделий; 4) всего перечисленного выше.

**81.** Визуально-оптический контроль металлических изделий может проводиться следующими способами:

1) прямым способом; 2) на расстоянии; 3) просвечиванием; 4) ответы 1) 2).

**82.** К отчетной документации относятся:

1) протоколы визуально-оптического контроля; 2) акты по проведению контроля; 3) заключение; 4) все перечисленное выше.

**83.** На каком этапе изготовления конструкции может быть проведен визуальный контроль:

1) до сварки; 2) в процессе сварки; 3) после сварки; 4) на всех перечисленных этапах.

**84.** Перерыв в работе при визуально-оптическом контроле с целью предупреждения утомления глаз и повышения качества контроля должен составлять:

1) 10 минут через каждые 0,5 часа работы; 2) 15 минут через каждый час работы; 3) 10 минут через каждый час работы; 4) 5 минут.

**85.** Визуально-оптический контроль должен:

1) предшествовать контролю всеми другими методами; 2) проводиться после радиографического контроля; 3) проводиться после капиллярного контроля; 4) последовательность проведения контроля не имеет принципиального значения.

**86.** Оптическая длина пути зависит от:

1) геометрической длины пути; 2) частоты; 3) показателя преломления среды; 4) ответы 1) и 3).

**87.** Управление качеством – это:

1) методы и деятельность оперативного характера, используемые для удовлетворения требований к качеству; 2) совокупность свойств и характеристик продукции, которые придают им способность удовлетворять обусловленные или предполагаемые потребности; 3) выполнение установленных требований; 4) все перечисленное выше.

**88.** Надзор за качеством – это:

1) выполнение установленных требований; 2) методы и деятельность оперативного характера, используемые для удовлетворения требований к качеству; 3) постоянное наблюдение и проверка состояния процедур, методов, условий исполнения в целях проверки того, что обусловленные требования выполняются; 4) все вышеперечисленное.

**89. Контроль:**

1) выполнение установленных требований; 2) действия, включающие проведение измерений (испытаний) одной или нескольких характеристик продукции и их сравнение с установленными требованиями с целью определения соответствия; 3) методы и деятельность оперативного характера, используемые для удовлетворения требований к качеству; 4) определение технического состояния объекта.

**90. Ровные или вогнутые части объекта контроля дают отблеск, который устраняется:**

1) правильным расположением источников света; 2) понижением освещенности; 3) расцвечиванием освещения; 4) применением наклонного освещения.

**91. К легирующим элементам относятся:**

1) марганец; 2) ванадий; 3) ответы 1) и 2); 4) фосфор.

**92. К сталим аустенитного класса относятся:**

1) высоколегированные стали с высоким содержанием хрома и никеля типа 12Х1810Т; 2) коррозионно-стойкие жаропрочные стали типа 20Х13Н18; 3) стали с содержанием легирующих элементов 2,5...10 %; 4) ответы 1) и 2).

**93. Специалист НК 1 уровня:**

1) осуществляет контроль в соответствии с разработанными методиками; 2) дает оценку результатам контроля; 3) составляет методику контроля; 4) проводит квалификационные экзамены для специалистов других уровней.

**94. Специалист НК 2 уровня:**

1) осуществляет контроль в соответствии с разработанными методиками; 2) дает оценку результатам контроля; 3) составляет методику контроля; 4) ответы 1), 2), 3).

**95. Специалист НК 3 уровня:**

1) проводит метрологическую поверку средств контроля; 2) проводит экзамены по установлению квалификации специалистов неразрушающего контроля; 3) занимаются ремонтом средств контроля; 4) ответы 1) и 2).

**96. При плохом освещении в глазу:**

1) действует система колбочек; 2) действует система палочек, нет видения цветов; 3) имеется видения цветов; 4) ответы 1) и 2).

**97. При хорошем освещении:**

1) действует система колбочек; 2) имеется видения цветов; 3) действует система палочек; 4) ответы 1) и 2).

**98. Лупы:**

1) простые оптические инструменты; 2) увеличивающие инструменты с

увеличением не больше, чем в 20 крат; 3) увеличивающие инструменты с увеличением не меньше 20 крат; 4) ответы 1) и 2).

**99.** К средствам приближения относятся:

1) лупы; 2) микроскопы; 3) телескопы, призматические бинокли; 4) ответы 1) и 2).

**100.** Вид термообработки, приводящий к значительной твердости и снятию внутренних напряжений, это:

1) предварительный прогрев; 2) отпуск; 3) отжиг; 4) закалка.

### Ответы на вопросы общего экзамена

25	4	50	2	75	4	100	1
24	2	49	4	74	2	99	3
23	3	48	4	73	3	98	4
22	2	47	2	72	4	97	4
21	4	46	1	71	2	96	2
20	3	45	3	70	2	95	2
19	1,4	44	3	69	3	94	4
18	2	43	4	68	3	93	1
17	3	42	2	67	4	92	4
16	2	41	2	66	4	91	3
15	4	40	4	65	4	90	2
14	4	39	2-4	64	4	89	2
13	1	38	2	63	1	88	3
12	4	37	1	62	2	87	1
11	2	36	1	61	3,4	86	4
10	2,4	35	1	60	1	85	1
9	2,4	34	3	59	3	84	3
8	1,2	33	2	58	4	83	4
7	2,3	32	1	57	4	82	4
6	2,3	31	4	56	4	81	4
5	1-5	30	4	55	1	80	4
4	3,4	29	1	54	2	79	4
3	4	28	1	53	4	78	4
2	3,4	27	1	52	4	77	1
1	2	26	1	51	4	76	4

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Соснин Ф.Р.* Неразрушающий контроль: Справ.: В 7 т. /Под ред. В.В.Клюева. – Т. 1: В 2 кн.: Кн. 1: Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2: Радиационный контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 560 с.
2. *Щепковский В.И.* Визуально-оптический и измерительный контроль. – Запорожье, Издание «МоторСич», 2004. – 316 с.
3. *Измерения. Контроль. Качество. Неразрушающий контроль.* – М.: ИПК Изд-во Стандартов, 2002. – 709 с.
4. *Слепцов О.И., Лыгlaев A.B., Большаков A.M., Синцов C.A.* Диагностика и безопасность стареющих больших механических систем, эксплуатирующихся в условиях крайнего севера: проблемы и пути решения. – Дефектоскопия. – 2008. – № 6. – С. 31–42.
5. *Мирошниченко Б.И.* Роль напряженного состояния в формировании дефектов стресс-коррозии в трубопроводах. – Там же. – С. 42–50.
6. *Дефекты стали.* Справ. изд. /Под ред. Новокшеновой С.М., Виноград М.И. – М.: Металлургия, 1984. – 199 с.
7. *Инструкция по визуальному и измерительному контролю.* РД 34.10.130-96, С-П.: Издание ДЕАН, 2001. – 120 с.
8. *Измерения в промышленности:* Справ.: В 3-х кн. Кн. 1: Теоретические основы: Пер. с нем. /Под ред. П.Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 492 с.
9. *Теория оптических систем:* Учеб. для вузов /Б.Н.Бегунов, И.П.Заказнов, С.И.Киришин, В.И.Кузичев //2-е изд. Перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 432 с.
10. *Справочная книга по светотехнике* /Под ред. Ю.Б.Айзберга. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с.
11. *Троицкий В.А.* Краткое пособие по контролю качества сварных соединений. – Киев, Феникс, 2006. – 320 с.
12. *СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение* /Минстрой России ГП ЦПП, 1995. – 35 с.
13. *ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования.*
14. *Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов* /Госгортехнадзор России, НПО ОБТ, 1997.
15. *Демирчоглян Г.Г.* Как сохранить и улучшить зрение. – Л.: Сталькер, 1997. – 320 с.
16. *Зрение без очков:* Пер. с англ. /Сост. В.В.Шарпило. – Минск, Па-

- радокс, 1997. – 416 с.
17. Сварка и свариваемые материалы: Справ. изд. В 3-х т.: Т. 1: Свариваемость материалов /Под ред. Э.Л.Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
  18. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.
  19. Троицкий В.А. Пособие по радиографии сварных соединений. – Киев, Феникс, 2008. – 312 с.
  20. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов. НПО ОБТ, 1993.
  21. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением. – Недра, 1989.
  22. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. НПО ОБТ, 1994.
  23. ПНАЭГ-7-008-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения.
  24. ПНАЭГ-7-010-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и направка. Правила контроля.
  25. Ультразвуковой контроль: дефектоскопы, нормативные документы, стандарты по УЗК /Сост. Троицкий В.А. – Киев, Феникс, 2006. – 224 с.
  26. ПНАЭГ-7-016-89. Унифицированные методики контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавок оборудования и трубопроводов АЭУ. Визуальный и измерительный контроль.
  27. ГОСТ 5264-80. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные. Основные типы, конструктивные элементы и размеры.
  28. ГОСТ 9378-75. Образцы шероховатости (сравнения). Технические требования.
  29. ГОСТ 23479-79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования.
  30. ГОСТ 11534-75. Ручная дуговая сварка. Соединения сварные под острыми и тупыми углами. Основные типы. Конструктивные элементы и размеры.
  31. ГОСТ 16037-80. Соединения сварные стальных трубопроводов. Основные типы. Конструктивные элементы и размеры.
  32. Троицкий В.А. Магнитопорошковый контроль сварных соединений и деталей машин. – Киев, Феникс, 2002. – 300 с.
  33. ГОСТ 8.326-86. ГСН. Метрологическая аттестация средств измерений.
  34. РД 34.10.126-94. Инструкция по операционному контролю процессов сборки, сварки и термообработки. – М.: АО «Энергомонитажпроект», 1994.
  35. Номенклатура средств линейных и угловых измерений, реко-

- мендуемых для применения в строительно-монтажных организациях Минмонтажспецстроя СССР. – М.: ЦБНТИ, 1987.
36. Щербинский В.Г., Феоктистов В.А., Полдевик В.А. и др. Методы дефектоскопии сварных соединений. – М.: Машиностроение, 1987. – 520 с.
  37. Моцохин С.Б. Контроль качества сварных соединений и конструкций. – М.: Стройиздат, 1985. – 380 с.
  38. Козлов В.В. Проверка средств неразрушающего контроля. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 240 с.
  39. Волченко В.Н., Гурвич А.К., Майоров А.Н. и др. Контроль качества сварки. – М.: Машиностроение, 1975. – 420 с.
  40. Ханапетов М.В., Блинов А.П., Фоминых В.П. Организация и технология сварочно-монтажного производства. – М.: Стройиздат, 1972. – 318 с.
  41. Троицкий В.А. Вихревоковый контроль. – Киев: Феникс, 2011. – 148 с.
  42. Стандарт СТТУ ЦС УТНКТД01–2011. Система сертифікації персоналу з неруйнівного контролю. Основні положення.
  43. Кліменко В.З., Белов І.Д. Випробування та обстеження будівельних конструкцій і споруд. – Київ: Основа, 2005. – 208 с.
  44. Баращиков А.Я., Малишев О.М. Оцінювання технічного стану будівель та інженерних споруд: Навч. посіб. для студ. Вищих навч. закл. – Київ: Основа, 2008. – 320 с.
  45. Технічне обстеження та нагляд за безпечною експлуатацією будівель та інженерних споруд / О.М. Малишев, В.Д. Віроцький, О.О. Нілов та ін. // За ред. О.М. Малишева. – 2007. – 708 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

I.	Введение	3
II.	Международные, национальные и отраслевые стандарты по визуальному контролю	7
III.	Требования к персоналу, выполняющему визуальный контроль	11
IV.	Общие требования к методам оптического вида	15
V.	Основные термины и определения	21
VI.	Визуальный контроль сварных швов, выполненных плавлением	27
VII.	Основные понятия, термины и определения шероховатости поверхности	29
VIII.	Элементы физической оптики	41
1.	Основные понятия	41
2.	Световые величины	43
3.	Оптические характеристики материалов	48
4.	Метрология оптического излучения	52
5.	Государственная система метрологии средств контроля	55
IX.	Основные свойства зрения человека, используемые при визуальном обнаружении дефектов	57
1.	Строение глаза и его свойства	57
2.	Видимость объектов, контрастная чувствительность, разрешающая способность и острота зрения	62
3.	Цветоощущение глаза человека	68
4.	Временные и усталостные зависимости свойств зрения	70
5.	Адаптация глаза, его пороговая чувствительность, цветовая слепота	70
6.	Реальный образ и иллюзии при зрительном восприятии объекта	74
X.	Источники света и эффективность визуального контроля	77
1.	Технические и субъективные причины, снижающие качество визуального контроля	77
2.	Массовые источники теплового и люминесцентного излучения	80
3.	Светоизлучающие диоды	81
4.	Лазеры	82
5.	Нормирование отдельных типов освещения	85
6.	Освещение различных производственных помещений	88
XI.	Инструменты для оптических исследований	91
1.	Требования к аппаратуре визуально-оптического контроля	91
2.	Зеркала, очковые линзы и очки	92
3.	Свойства линз, устройство луп, использование их в производственности	95
4.	Телескопические системы, их устройство	102
5.	Микроскопы	104
XII.	Средства для обследования недосягаемых зон	114

XIII.	Основы угловых и линейных измерений	127
1.	Виды погрешности, основные понятия	127
2.	Средства измерительного контроля	136
3.	Штангенциркульные и микрометрические измерительные приборы	138
4.	Некоторые нестандартные приемы и порядок измерений	165
5.	Применение приборов при визуально-измерительных процедурах, ложные изображения	172
XIV.	Подготовка рабочих мест и объектов для визуально-измерительного контроля	179
XV.	Проверка подготовки и сборки деталей под сварку	182
XVI.	Процедуры визуального и измерительного контроля качества сварных соединений	192
1.	Нормативная база	192
2.	Контроль качества сварочных материалов и процесса выполнения сварных швов	193
3.	Порядок выполнения визуального и измерительного контроля сварных соединений	203
4.	Порядок выполнения контроля сварных конструкций в целом	206
5.	Порядок выполнения контроля после исправления дефектных мест	209
XVII.	Специфика визуально-измерительного контроля в различных отраслях промышленности	214
1.	Контроль элементов энергетических объектов	214
2.	Контроль элементов нефтеперерабатывающих объектов	218
3.	Контроль трубопроводов	219
4.	Визуально-оптический контроль авиационной техники	222
XVIII.	Дефекты продолжительно эксплуатируемых объектов	224
1.	Трещины различного рода и их происхождение	224
2.	Коррозия металлов	227
3.	Дефекты от воздействия динамических нагрузок	234
4.	Усталость и выносливость	235
XIX.	Регистрация результатов визуального и измерительного контроля	240
XX.	Международные и национальные стандарты обучения и сертификации персонала	244
XXI.	Подготовка специалистов по визуальному и измерительному контролю	253
1.	Общетехнический курс для предприятия энергетического комплекса	253
2.	Европейские правила подготовки операторов по визуальному контролю	257
3.	Программа подготовки по ICNDT и EN 473 на разные уровни квалификации	258
XXII.	Вопросы и ответы для самоподготовки к общему экзамену на уровень 2 квалификации по визуально-измерительному контролю	261
XXIII.	Литература	271

Виробничо-практичне видання

*Троїцький В. О.*

**Візуальний та вимірювальний  
контроль металоконструкцій  
і споруд**

*(рос. мовою)*

Підписано до друку . Формат 60x84/16.

Папір офсетний. Друк офсетний.

Ум. др. арк. 16,042. Обл.-вид. арк. 16,01.

Наклад 400. Зам. 11-745.

Віддруковано в друкарні “Видавництво “Фенікс”.

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи

ДК № 271 від 07.12.2000 р.

03680, Київ, вул. Шутова, 13б.

[www.kniga.kiev.ua](http://www.kniga.kiev.ua)