

СПРАВОЧНИК

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

1
ТОМ

МАШИНОСТРОЕНИЕ

СПРАВОЧНИК

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ

*Справочник в 8 томах
под редакцией академика РАН
В.В. КЛЮЕВА*



Том 1

Издание 2-е, переработанное и исправленное

Ф.Р. Соснин

**ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ
КОНТРОЛЬ**

Книга 1

Ф.Р. Соснин

РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ

Книга 2



МОСКВА "МАШИНОСТРОЕНИЕ" 2008

УДК 620.111.1+179.152

ББК 22.34+32.995

Н 54

Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. / Под общ. ред. Н54 В.В. Клюева. Т. 1: В 2 кн. Кн. 1. [Ф.Р. Соснин.] Визуальный и измерительный контроль. Кн. 2. [Ф.Р. Соснин.] Радиационный контроль. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2008. – 560 с.: ил.

ISBN 978-5-94275-410-5 (т. 1, кн. 1, кн. 2)

ISBN 978-5-94275-409-9

В первой книге рассмотрены вопросы визуального и измерительного контроля: оптика, оптические свойства глаза, светотехника, оптические системы, металловедение и термическая обработка, основы линейных и угловых измерений, классификация дефектов, процедур визуального и измерительного контроля изделий металлургической промышленности, сварных соединений, отливок, паяных соединений, особенности визуального и измерительного контроля в некоторых отраслях промышленности.

Во второй книге кратко изложены основные понятия, физические и технические основы методов и средств радиационного контроля. Даны новые сведения по средствам и организации контроля на предприятиях, радиационной защите и технике безопасности. Рассмотрены отдельные вопросы применения метода при контроле качества материалов (выявление дефектов в слитках, литых изделиях, сварных и паяных соединениях и т.д.) и функционировании узлов и механизмов, а также в научных исследованиях (регистрация быстро протекающих процессов, физических явлений в непрозрачных средах и т.д.).

Для инженерно-технических работников, разработчиков и пользователей указанных методов неразрушающего контроля, а также может быть полезен студентам и преподавателям вузов.

УДК 620.111.1+179.152

ББК 22.34+32.995

ISBN 978-5-94275-410-5 (т. 1, кн. 1, кн. 2)

ISBN 978-5-94275-409-9

© НИИИН МНПО «Спектр», 2008

© Издательство «Машиностроение», 2008

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, опубликованных в данной книге, допускаются только с разрешения издательства и со ссылкой на источник информации

ОГЛАВЛЕНИЕ

Книга 1. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

ПРЕДИСЛОВИЕ	7
Глава 1. ОПТИКА	9
1.1. Основные понятия	9
1.2. Энергетические фотометрические величины	10
1.3. Световые величины	12
1.4. Элементы физической оптики	13
1.5. Светотехнические и оптические характеристики материалов	15
1.6. Метрология оптического излучения	18
Глава 2. ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛАЗА	23
2.1. Функции и параметры зрения	23
2.2. Обработка сенсорных сигналов в мозге при зрительном восприятии	34
2.3. Глазные заболевания, их причины и профилактика ухудшения зрения	41
2.4. Медицинские требования к персоналу, осуществляющему визуальный и измерительный контроль	45
Глава 3. СВЕТОТЕХНИКА	47
3.1. Массовые источники оптического излучения	47
3.2. Некоторые специальные источники света	49
3.3. Световые приборы	52
3.4. Характеристики безопасности	53
3.5. Нормирование освещения	54
3.5.1. Определение эквивалентного размера протяженных объектов различения	58
3.5.2. Освещение производственных помещений	59
3.6. Освещение промышленных производств	60
Глава 4. ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	63
4.1. Зеркала, линзы и очки	63
4.2. Лупы	65
4.3. Телескопические системы и их основные характеристики	68
4.4. Микроскопы	70

4.5. Эндоскопы	79
4.6. Типичное использование промышленных эндоскопов	85
4.7. Агрегатные комплексы дистанционного визуального контроля	87
4.8. Фотообъектив и фотографическая съемка объектов контроля	90
Глава 5. ОСНОВЫ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ	93
5.1. Виды, погрешности и средства измерений	93
5.2. Понятия, относящиеся к эталонам, образцовым средствам измерений и метрологической службе	97
5.3. Средства для линейных и угловых измерений	99
5.4. Измерительные устройства, использующие методы неразрушающего контроля	103
5.5. Методы и средства измерения некоторых типовых изделий	104
Глава 6. ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕКТАМ КОНТРОЛЯ И РАБОЧЕЙ СРЕДЕ	111
6.1. Основные сведения о строении, свойствах металлов и сплавов	111
6.2. Основные сведения из теории сплавов	116
6.3. Железоуглеродистые сплавы	119
6.4. Отжиг и нормализация	125
6.5. Общие сведения о дефектах металлоизделий	128
6.6. Требования к контролю-пригодности объектов и рабочей среды	131
Глава 7. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	137
7.1. Металлургические дефекты	137
7.2. Использование систем оптической дефектоскопии	167
7.3. Методы и средства измерения толщины полосы при горячей и холодной прокатке в процессе ее производства	170

Глава 8. ДЕФЕКТЫ СВАРКИ И ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЕЕ КАЧЕСТВА	174	12.1.4. Нормы оценки качества сварных соединений ...	265
8.1. Дефекты сварки плавлением	174	12.1.5. Контроль насосов ...	266
8.2. Дефекты сварки пластическим деформированием	196	12.1.6. Контроль резьбовых соединений	268
8.3. Процедура визуального и измерительного контроля качества сварных соединений	205	12.1.7. Контроль лопаточного аппарата паровых турбин на тепловых электростанциях	268
Глава 9. ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ИХ КАЧЕСТВА	221	12.2. Контроль элементов химических и нефтеперерабатывающих объектов	271
9.1. Дефекты паяных соединений	221	12.3. Контроль элементов трубопроводов	273
9.2. Общие сведения о процедурах визуального и измерительного контроля паяных соединений	229	Глава 13. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ	277
Глава 10. ОТЛИВКИ, ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ИХ КАЧЕСТВА	230	13.1. Эксплуатационные дефекты	277
10.1. Дефекты отливок	230	13.1.1. Возникновение эксплуатационных дефектов в условиях воздействия статических нагрузок	278
10.2. Процедура визуального и измерительного контроля литых	250	13.1.2. Коррозия металлов	279
Глава 11. ДЕФЕКТЫ, ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ	253	13.1.3. Возникновение эксплуатационных дефектов в условиях воздействия динамических нагрузок	283
11.1. Дефекты металлических защитных покрытий	253	13.1.4. Растрескивание под действием термических напряжений	288
11.2. Оценка толщины металлических защитных покрытий без их разрушения	259	13.1.5. Радиационные повреждения	289
Глава 12. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ХИМИЧЕСКИХ, НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ТРУБОПРОВОДОВ	262	13.2. Визуальный и измерительный контроль при техническом диагностировании энергетических объектов	290
12.1. Контроль элементов энергетических объектов	262	13.3. Визуально-оптический контроль авиационной техники	291
12.1.1. Определение понятий однотипных контрольных сварных соединений и размерных показателей	262	Глава 14. ВЗАИМОСВЯЗИ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ С ДРУГИМИ СИСТЕМАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	301
12.1.2. Нормативно-технические и руководящие документы на визуальный и измерительный контроль	263	14.1. Визуальные аспекты систем радиационного контроля	301
12.1.3. Процедура визуального и измерительного контроля	264	14.2. Визуальные аспекты систем ультразвукового контроля	305
		14.3. Визуальные аспекты систем капиллярного контроля	307
		14.4. Визуальные аспекты систем магнитопорошкового контроля	308

14.5. Визуальные аспекты систем теченскания	310	3.5. Полупроводниковые преобразователи	371
14.6. Визуальные аспекты систем радиоволнового контроля	311	3.6. Сцинтилляционные преобразователи	373
Глава 15. МЕЖДУНАРОДНЫЕ И ЕВРОПЕЙСКИЕ СТАНДАРТЫ В ВИЗУАЛЬНОМ КОНТРОЛЕ	313	3.7. Рентгеновская пленка как детектор	376
ПРИЛОЖЕНИЕ. Рекомендации ICNDT WH 24-00	318	3.8. Регистрация нейтронного излучения	382
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	323	Глава 4. РАДИОГРАФИЯ	385
Книга 2. РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ	324	4.1. Общие характеристики радиационных изображений	385
ПРЕДИСЛОВИЕ	324	4.2. Выбор энергии источников фотонного излучения	395
Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИАЦИОННОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	327	4.3. Выбор рентгенографических пленок и их химико-фотографическая обработка	398
1.1. Строение атома	327	4.4. Выбор фокусного расстояния	409
1.2. Природа ионизирующего излучения	329	4.5. Диафрагмы, коллиматоры, фильтры и компенсаторы ионизирующего излучения	411
1.3. Характеристики ионизирующих излучений и параметры их взаимодействия с веществом	332	4.6. Режимы просвечивания ОК рентгеновским излучением	413
1.4. Взаимодействие фотонного излучения с веществом	333	4.7. Схемы просвечивания	422
1.5. Качественные характеристики рентгеновского излучения	340	4.7.1. Общие положения	422
1.6. Взаимодействие электронного излучения и альфа-частиц с веществом	342	4.7.2. Источник излучения перед контролируемым объектом, а пленка на противоположной стороне внутри	422
1.7. Взаимодействие нейтронного излучения с веществом	344	4.7.3. Источник излучения снаружи, а пленка внутри контролируемого объекта	423
Глава 2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ	348	4.7.4. Источник излучения внутри и по центру, а пленка вне контролируемого объекта	423
2.1. Способы ускорения электронов	348	4.7.5. Источник излучения внутри и по центру, а пленка снаружи контролируемого объекта	424
2.2. Рентгеновские аппараты	348	4.7.6. Способ эллипса	424
2.3. Источники высокоэнергетического излучения	356	4.7.7. Способ перпендикулярной съемки	425
2.4. Радионуклидные источники излучения	357	4.7.8. Источник излучения вне контролируемого объекта, а пленка – на другой стороне	425
2.5. Источники нейтронов	363	4.7.9. Способ для материалов различной толщины	426
Глава 3. РЕГИСТРАЦИЯ ПРОНИКАЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ. ПРИНЦИПЫ И СИСТЕМЫ	366	4.7.10. Контроль кольцевого стыкового сварного шва	426
3.1. Классификация детекторов	366	4.8. Расшифровка радиографических снимков	433
3.2. Принципы детектирования	366	4.9. Документальное оформление результатов радиографического контроля	435
3.3. Принципы регистрации ионизирующих излучений	368		
3.4. Ионизационный метод измерений ионизирующих излучений	368		

4.10. Артефакты радиографических снимков	436	6.4. Измерители толщины материалов	511
4.11. Виды дефектов ОК и причины их возникновения	437	6.5. Вычислительная томография	513
4.12. Радиография с использованием фотобумаги	440	6.6. Томография с использованием рассеянного излучения ...	519
4.13. Радиография с источниками излучения высоких энергий	441	Глава 7. РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ	524
4.14. Микрорентгенография	445	7.1. Термины и определения ...	524
4.15. Импульсная рентгенография	446	7.2. Общие положения	527
4.16. Динамическая радиография	448	7.3. Система обеспечения безопасных условий труда при радиационном неразрушающем контроле	530
4.17. Радиографические методы измерения толщины ОК	450	7.4. Принципы защиты от ионизирующих излучений при радиационном контроле	532
4.18. Радиографические методы определения местоположения дефектов	451	7.5. Методы радиационного контроля	534
4.19. Электрорентгенография	454	Глава 8. НАЦИОНАЛЬНЫЕ, РЕГИОНАЛЬНЫЕ И МЕЖДУНАРОДНЫЕ СТАНДАРТЫ В РАДИАЦИОННОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ	537
4.20. Нейтронная радиография	455	8.1. Стандарты России	537
4.21. Цифровая рентгенография	457	8.2. Международные, региональные и национальные (США) организации по стандартизации неразрушающего контроля	538
Глава 5. РАДИОСКОПИЯ	461	8.3. Предметный указатель стандартов ISO и CEN	539
5.1. Общая характеристика радиоскопии	461	8.4. Стандарты и проекты ISO по радиографии	540
5.2. Выбор источников и энергии фотонного излучения при радиоскопии	465	8.5. Стандарты (EN) и проекты стандартов (PR EN) по радиографии	542
5.3. Флюороскопия	466	8.6. Важнейшие стандарты CEN и США и их основные отличия	545
5.4. Радиоскопия с использованием усилителей радиационных изображений	472	ПРИЛОЖЕНИЕ. Рекомендации ICNDT WH 17-85. изм. 01	548
5.5. Средства манипулирования ОК и методика радиационной интроскопии	486	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	558
5.6. Цифровые методы улучшения изображения при радиоскопии	490		
5.7. Радиоскопические цифровые системы	498		
Глава 6. РАДИОМЕТРИЯ	500		
6.1. Общие вопросы радиометрии...	500		
6.2. Выбор источников и энергии фотонного излучения при измерении его параметров после прохождения через ОК	503		
6.3. Выбор детекторов, их электронных схем и коллиматоров	507		

Книга 1

ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга посвящена изучению и анализу широкого круга вопросов визуального и измерительного контроля. Ее основная цель — обобщить информацию в ранее вышедших книгах [1 — 8 и др.] и нормативных документах [9 — 12 и др.], по таким темам, как оптика, оптические свойства глаза, светотехника, оптические системы, металловедение и термическая обработка, основы линейных и угловых измерений, классификация дефектов, процедур визуального и измерительного контроля изделий металлургической промышленности, сварных соединений, отливок, паяных соединений, особенности визуального и измерительного контроля в некоторых отраслях промышленности.

Практика показывает, что аварии и катастрофы, происходящие при разрушении элементов конструкций объектов, машин и изделий, почти всегда связаны с наличием в них дефектов (от лат. *defectus* — недостаток).

Все дефекты объединяются одним общим признаком: они ухудшают качество продукции. В процессе развития техники бездефектность изделий всегда была важным фактором. Даже при использовании наилучших материалов, наиболее совершенных конструкций и технологических процессов в готовых изделиях могут быть дефекты.

Строго *дефектом* называют каждое *отдельное несоответствие* продукции установленным требованиям. Многообразие встречающихся в изделиях дефектов, их различное влияние на качество изделий

приводят к безусловному определению понятия дефекта.

В технической литературе (монографиях, справочниках, ряде информационных документов и т.п.) термин "*дефект*" трактуется значительно шире, например, как "*изъян*", "*порок*", "*несплошность*" и т.п., часто не связывая это понятие с конкретными техническими требованиями, а имея в виду только нежелательные локальные вариации прочности и физико-химических свойств продукции.

Для выявления дефектов используют различные виды контроля изделий и среди них важное место занимает *визуальный и измерительный контроль*.

Этот вид контроля отличается от других видов неразрушающего контроля (НК) границами спектральной области электромагнитного излучения, используемого для получения информации об объекте контроля. Видимое излучение (свет) — излучение, которое может непосредственно вызывать зрительное ощущение. И действительно, визуальный контроль — это единственный вид НК, который может выполняться и часто выполняется без какого-либо оборудования и проводится с использованием простейших измерительных средств.

Ввиду того, что некоторые технические средства визуального и измерительного контроля доступны каждому, а сама процедура контроля кажется достаточно простой, предполагают, что любое обсуждение этого метода может быть простым и быстрым. Фактически же визуальный и

измерительный контроль является таким же современным сложным видом контроля, как радиационный и ультразвуковой.

Для эффективного выявления дефектов специалисты по любому виду НК должны уметь выбрать подход, разработать методику проведения испытания и создать необходимые приспособления. Кроме того, эти специалисты должны соответствующим образом подготовить технического персонал для проведения требуемого испытания и обработки его результатов.

Специалистам высокой квалификации, проводящим НК, приходится сталкиваться со многими аспектами проблем поиска дефектов. Чтобы достичь конечной цели, необходимо:

1) иметь информацию о материалах, их свойствах и характеристиках, а также о влиянии условий изготовления термообработки и эксплуатации на эти свойства;

2) знать причины образования дефектов, пути их предотвращения и способы устранения;

3) знать 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 и приемов, используемых при НК;

6) разбираться в способах регистрации, хранения и обработки данных, получаемых с помощью различных методов неразрушающих испытаний;

7) знать достоинства, недостатки и пределы применимости каждого из многочисленных методов и приемов НК.

Учитывая это, основополагающие нормативные документы по сертификации специалистов НК как национальные (Россия, США, Англия и др.) и региональные (EN 473, системы NORDTEST и

др.), так и международный стандарт ISO 9712, требуют от сдающих квалификационные экзамены глубоких знаний, в том числе и по материаловедению, по причинам образования дефектов, распределению их по типам и наиболее вероятным зонам образования.

Упомянутые выше нормативные документы по сертификации специалистов НК обязывают сертифицировать персонал строго в рамках производства и рабочего места сертифицируемого персонала или в рамках определенного промышленного сектора, который часто относят к такой продукции, как металлургическая, литье, сварные соединения и т.п. Поэтому в начале гл. 7 – 11 в сжатой форме изложены элементы основ соответствующих технологий и ссылки на литературу.

Очевидно, что специалист по НК, не знающий и не понимающий технологии изготовления изделий, а также причины возникновения дефектов при изготовлении и эксплуатации этих изделий, не сможет надежно и экономно их проконтролировать.

Численность персонала, по роду своей деятельности связанного с проблемами визуального и измерительного контроля, постоянно растет. Эти работники как правило не получили соответствующих знаний в институтах или других учебных заведениях, им приходится постигать основы визуального и измерительного контроля в процессе своей трудовой деятельности. Этим объясняется большая потребность в учебном материале в системе переквалификации и повышения квалификации специалистов в области визуального и измерительного контроля.

Эта книга энциклопедии "Неразрушающий контроль" должна внести свой вклад в удовлетворение этой потребности, а также способствовать международному сотрудничеству в области НК с целью создания новых техники и технологий.

Глава 1

ОПТИКА

1.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Электромагнитное излучение представляет собой электромагнитные волны, испускаемые источником, свободно распространяющиеся в пространстве и ничем не связанные с источником, образовавшим эти волны.

Электромагнитные волны – это возмущения электромагнитного поля (взаимосвязанных электрического и магнитного полей), распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью.

В свободном пространстве (в вакууме) эти волны являются поперечными и скорость их распространения $c \approx 3 \cdot 10^{10}$ см/с.

Характерной особенностью электромагнитного излучения является корпускулярно-волновой дуализм.

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

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

Фотон – это квант поля электромагнитного излучения. Элементарная частица, обладающая нулевой массой покоя, энергией $\epsilon = h\nu$, где $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – квант действия (постоянная Планка); ν – 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 излучение, ультрафиолетовое излучение и инфракрасное излучение.

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 граница 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.

Оптическое излучение характеризуется тремя видами величин.

1. *Энергетические фотометрические величины* X_e – величины, определяющие временное, пространственное, спектральное распределение энергии оптического излучения, количественно выражаемое в единицах энергии (мощности) или в производных от них.

2. *Фотонные фотометрические величины* X_p – величины, количественно выражаемые в безразмерных единицах числа фотонов и производных от него.

3. *Редуцированные фотометрические величины* X_v – величины, характеризующие оптическое излучение по его воз-

действию на заданный селективный приемник.

В Международную систему единиц включены единицы только одного вида редуцированных величин – световые величины.

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

1.2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Энергия излучения Q_e – энергия, переносимая излучением. Эта энергия, как и любая другая, имеет размерность:

$$\dim Q_e = L^2 MT^{-2}$$

и выражается в джоулях ($[Q_e] = 1 \text{ Дж}$), где L – размерность длины; M – размерность массы; T – размерность времени.

Поток излучения Φ_e – мощность излучения, определяемая отношением переносимой энергии к времени переноса, значительно превышающему период электромагнитных колебаний:

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

Размерность и единица потока излучения:

$$\dim \Phi_e = L^2 MT^{-3}, [\Phi_e] = 1 \text{ Дж/с} = 1 \text{ Вт}.$$

Сила излучения I_e – величина, определяемая отношением потока излучения $d\Phi_e$, распространяющегося от источника излучения внутри малого телесного угла $d\Omega$, содержащего рассматриваемое направление к этому телесному углу (рис. 1.1):

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

Размерность и единица силы излучения:

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

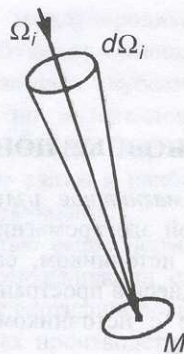


Рис. 1.1. К определению понятия "пространственная облученность"

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. $d\Omega = dA/r^2$.

За единицу 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, изучающего 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 ими можно пренебречь при расчетах.

Энергетическая светимость M_e – физическая величина, равная отношению потока $d\Phi_e$, исходящего от рассматриваемого малого участка поверхности, к площади dA этого участка:

$$M_e = d\Phi_e / dA.$$

Размерность и единица энергетической светимости:

$$\dim M_e = MT^{-3}, [M_e] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

Ватт на квадратный метр равен энергетической светимости, при которой поверхность, площадью 1 м^2 , излучает поток излучения 1 Вт (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Схема процесса испускания электромагнитных волн и их воздействие на приемник

Облученность E_e – величина, определяемая отношением потока излучения $d\Phi_e$, поглощенного малым участком поверхности, содержащей рассматриваемую точку, к площади dA этого участка:

$$E_e = d\Phi_e/dA.$$

Размерность и единица облученности:

$$\dim E_e = MT^{-3}, [E_e] = 1 \text{ Вт/м}^2.$$

Ватт на квадратный метр равен облученности, при которой поверхность, площадью 1 м^2 , поглощает поток излучения 1 Вт (рис. 1.2).

Энергетическое освечивание Θ_e – величина, определяемая интегралом силы излучения по времени:

$$\Theta_e = \int I_e dt.$$

При постоянной силе излучения:

$$\Theta_e = I_e \Delta t.$$

Размерность и единица энергетического освечивания:

$$\dim \Theta_e = L^2 MT^{-2}, [\Theta_e] = 1 \text{ Дж/ср}.$$

Энергетическая экспозиция H_e – величина, определяемая интегралом облученности по времени:

$$H_e = \int E_e dt.$$

При постоянной облученности:

$$H_e = E_e \Delta t.$$

Размерность и единица энергетической экспозиции:

$$\dim H_e = MT^{-2}, [H_e] = 1 \text{ Дж/м}^2.$$

Энергетическая яркость L_e в точке поверхности и в заданном направлении – величина, равная отношению силы излучения dI_e элемента излучающей поверхности к площади dA ортогональной проекции этого элемента на плоскость, перпендикулярную направлению наблюдения:

$$L_e = dI_e/dA.$$

Размерность и единица энергетической яркости:

$$\dim L_e = MT^{-3}, [L_e] = 1 \text{ Вт/(ср·м}^2\text{)}.$$

Ватт на стерадиан-квадратный метр равен энергетической яркости, равномерно излучающей плоской поверхностью

площадью 1 м^2 , в перпендикулярном ей направлении при силе излучения 1 Вт/ср (рис. 1.2).

Энергетическая интегральная яркость Λ_e – величина, определяемая интегралом энергетической яркости по времени:

$$\Lambda_e = \int L_e dt.$$

Размерность и единица интегральной энергетической яркости:

$$\dim \Lambda_e = \text{МТ}^{-2}, [\Lambda_e] = 1 \text{ Дж}/(\text{ср} \cdot \text{м}^2).$$

Спектральная плотность энергетической светимости по длине волны $M_{e,\lambda}$ (по частоте $M_{e,f}$) представляет собой отношение среднего значения энергетической светимости $\overline{M_e}$ в рассматриваемом малом спектральном интервале к ширине $\Delta\lambda$ (Δf) этого интервала:

$$M_{e,\lambda} = \frac{\overline{M_e}}{\Delta\lambda}, \quad M_{e,f} = \frac{\overline{M_e}}{\Delta f},$$

$$[M_{e,\lambda}] = 1 \text{ Вт}/\text{м}^2; [M_{e,f}] = 1 \text{ Дж}/\text{м}^2.$$

Аналогично образуются спектральные плотности других энергетических фотометрических величин.

1.3. 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.

Размерность и единица силы света следующие:

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

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

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:

$$\dim \Phi = J, [\Phi_v] = 1 \text{ кд} \cdot \text{рад} = 1 \text{ лм}.$$

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:

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

Световая энергия может быть определена также, как любая редуцированная световая величина по соотношению:

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

где K_m – переводной множитель при переходе от единиц энергетических величин к единицам световых величин; $Q_{e,\lambda}$ – спектральная плотность энергии излучения по длине волны; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность.

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

$$\dim L_v = L^{-1} J, [L_v] = 1 \text{ кд/м}^2.$$

Кандела на квадратный метр равна яркости светящейся поверхности площадью 1 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:

$$\dim M_v = L^{-2} J, [M_v] = 1 \text{ лм/м}^2.$$

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:

$$\dim E_v = L^{-2} J, [E_v] = 1 \text{ лм/м}^2 = 1 \text{ лк}.$$

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

Освечивание Θ_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 освечивания:

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

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:

$$\dim H_v = L^{-2} TJ, [H_v] = 1 \text{ лк} \cdot \text{с}.$$

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

$$H_v = dQ_v / dA.$$

1.4. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ

Поляризация света – упорядочение в ориентации векторов напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{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 \vec{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.

Колебание монохроматической волны описывается уравнением:

$$y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right),$$

где a – амплитуда колебания; $T = 1/\nu$ – период колебания.

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 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.

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, φ и χ связаны законом Снеллиуса-Декарта: $n_1 \sin \varphi = n_2 \sin \chi$, где n_1 и n_2 – показатели преломления сред.

Оптической длиной пути называют произведение показателя преломления n на геометрическую длину l . Два пути световых волн, имеющих одинаковые оптические длины, называются *тавтохромными*, так как такие пути 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 ϵ и магнитной μ проницаемостями выражением $n = \sqrt{\epsilon\mu}$. Длина

волны λ 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.

Явления, обусловленные зависимостью показателя преломления вещества от длины волны света $n = f(\lambda)$, называются *дисперсией*. Для всех прозрачных веществ

n монотонно возрастает с уменьшением λ , 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 λ световых колебаний. Площадь такого элементарного участка пропорциональна λ^2 .

1.5. СВЕТОТЕХНИЧЕСКИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ

Материалы, предназначенные для 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, фотоэлементов и т.д.

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

Распределение общего светового потока по составляющим зависит от спектрального состава падающего света и свойств самого материала (рис. 1.3).

Для количественной характеристики светотехнических свойств материала вводятся коэффициенты: отражения – ρ , поглощения – α , пропускания – τ . Они определяются следующими соотношениями:

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

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

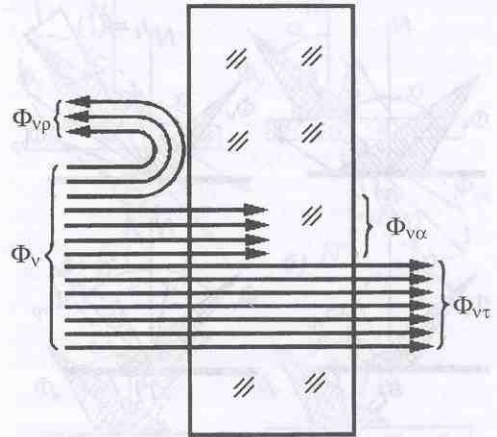


Рис. 1.3. Схема прохождения светового потока через материал:

Φ_{vp} – отраженный световой поток;

$\Phi_{v\alpha}$ – поглощенный световой поток;

Φ_{vt} – пропущенный световой поток

Большинство светотехнических материалов по-разному воздействует на излучение различных длин волн и наряду с пространственным перераспределением светового потока изменяет его спектральный состав.

Поэтому для характеристики взаимодействия материала с монохроматическим излучением (излучением одной длины волны) вводятся соответствующие спектральные коэффициенты: отражения – ρ_λ , поглощения – α_λ , пропускания – τ_λ . Изменение этих коэффициентов в зависимости от длины волны излучения графически обычно изображается спектральными кривыми, т.е. зависимостями вида

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

Важнейшими светотехническими характеристиками являются следующие:

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

2. Степень рассеяния γ (для пропускающих материалов):

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

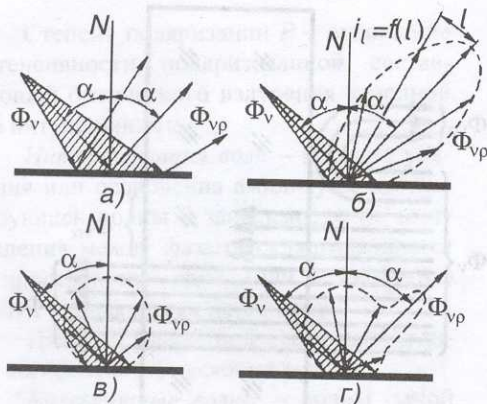


Рис. 1.4. Виды отражений светового потока: а – направленное (зеркальное); б – направленно-рассеянное; в – диффузное; г – смешанное

где J_{40} и J_0 – силы света от светового пятна на образце в проходящем свете под углами 40° и 0° к нормали поверхности образца.

3. Коэффициент рассеяния δ (для светоотражающих материалов):

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

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

4. Продольная кривая (индикатриса) рассеяния i_e (е) светового потока, прошедшего или отраженного материалом. Эта кривая получается при пересечении фотометрического тела рассеяния плоскостью, проходящей через нормаль и максимальный радиус-вектор силы света.

Под фотометрическим телом рассеяния понимают пространство, ограниченное поверхностью, являющейся геометрическим местом концов радиусов-векторов силы света.

Для светопропускающих материалов индикатриса рассеяния – это кривая зависимости силы света от угла наблюдения освещенного пятна в проходящем свете $J = f(\beta)$, построенная обычно в полярной системе координат.

Для светоотражающих материалов чаще используется понятие индикатрисы коэффициентов яркости r . При этом коэффициент яркости r_α определяется отношением яркости освещенного пятна на данном материале в направлении угла α к яркости идеальной, равномерно отражающей во всех направлениях поверхности с $\rho = 1$ при таких же условиях освещения и под тем же углом наблюдения. Индикатриса коэффициентов яркости характеризует блеск (или глянец) материала.

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. Для некоторых светотехнических материалов могут использоваться и другие характеристики: степень поляризации, оптическая плотность, световая отдача и др.

По характеру распределения в пространстве отраженного светового потока выделяют следующие виды отражения: направленное (зеркальное), направленно-рассеянное, диффузное и смешанное. Распределение отраженного светового потока для этих случаев дано на рис. 1.4.

Особенности отражения света положены в основу классификации отражающих светотехнических материалов, в соответствии с которой различают материалы: с направленным (зеркальным) отражением светового потока, с направленно-рассеянным, диффузным и со смешанным.

Характер отражения определяется структурой материала, состоянием его поверхности, типом поляризации падающего света и т.д.

Простейший (идеализированный) случай – отражение света от бесконечной плоской границы раздела между двумя однородными средами. Направление распространения отраженной волны не зависит от вида сред:

1) отраженный луч находится и плоскости падения;

2) угол падения (угол между лучом падающей волны и нормалью) равен углу отражения (угол между лучом отраженной волны и нормалью).

Различают отражение от диэлектриков и металлов. 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. 1.5.

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. 1.5, а). 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. 1.5, б). Подобным пропусканием обладают матированные светопропускающие материалы.

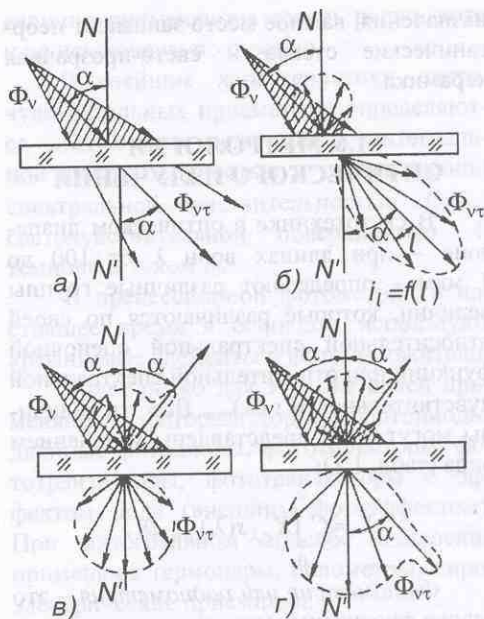


Рис. 1.5. Виды пропускания светового потока:

а — направленное; б — направленно-рассеянное; в — диффузное; г — смешанное

Пропускание, когда телесный угол пропущенного светового потока больше угла падающего и составляет в плоскости угла 2π , называют диффузным (рис. 1.5, 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 оказывается рассеянным 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 пропущенного светового потока происходит его частичное пропускание (рис. 1.5, г). Примером таких материалов могут служить слабоглушенные стекла.

Из большого класса светопропускающих материалов, применяемых для изготовления изделий светотехнического

назначения, важное место занимают неорганические стекла и свето-прозрачная керамика.

1.6. МЕТРОЛОГИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В светотехнике в оптическом диапазоне – при длинах волн λ от 100 до 1 мкм – определяют различные группы величин, которые различаются по своей относительной спектральной оценочной функции или относительной спектральной чувствительности $s(\lambda)_{\text{отн}}$. Все эти величины могут быть представлены уравнением вида (табл. 1.1):

$$X = C \int_0^{\infty} X_{e,\lambda} s(\lambda)_{\text{отн}} d\lambda.$$

Фотометрия или радиометрия – это раздел физической оптики, в котором рассматриваются измерения средних по пространству и времени энергетических параметров оптического излучения.

Измеряют обычно светометрические (светотехнические) свойства: ламп (источников излучения), световых приборов, осветительных установок, приемников, материалов.

Основными светотехническими величинами, подлежащими измерению, обычно могут быть световой поток Φ_v , освещенность E_v , яркость L_v , сила света J_v , а также производные от них.

Основой всех фотометрических способов измерения светотехнической вели-

чины 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 видности).

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

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

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 вышеприведенному 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 $V(\lambda)$.

1.1. Значения параметров C и $s(\lambda)_{\text{отн}}$ для фотометрических величин различных видов

Фотометрическая величина	C	$s(\lambda)_{\text{отн}}$
Энергетическая	1	1
Фотонная	$\lambda_0^*/(hc)$	λ/λ_0
Редуцированная светотехническая	K_m	$V(\lambda)$

* $\lambda_0 = 555$ нм

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

Если требуется оценить иную светотехническую величину, чем та, которая поддается непосредственному измерению, то следует при помощи соответствующих устройств (особых измерительных приспособлений и т.п.) привести требуемую величину к непосредственно поддающейся измерению.

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

Фотометр представляет собой прибор для измерения фотометрических (светотехнических) величин. К фотометрам относятся: измерительные приборы (например, приборы для измерения освещенности), измерительные устройства (например, сферические фотометры), или измерительные установки (например, гониофотометры).

Основными элементами фотометров являются фотометрические головки, измерительные преобразователи и блоки выдачи информации.

Фотометрическая головка состоит из светочувствительного приемника и устройств для спектральной оценки света (например, фильтров). Она имеет также приспособления для определенной оценки света в зависимости от направления.

В фотометрии в качестве светочувствительных приемников в настоящее время применяют почти исключительно фотоэлектронные модули и тепловые приемники излучения. Значение глаза, как средства измерения, упало с развитием физических приемников, и визуальные приборы для прямого определения световых

величин применяются теперь редко, хотя и не исключены полностью.

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 прещессионной фотометрии в настоящее время в основном используют кремниевые элементы и фотоумножители.

Более редко для этих же целей применяют: фоторезисторы, фотодиоды, двойные фотодиоды, фототиристоры, фототранзисторы, фототранзисторы с эффектом поля (внешним фотоэффектом). При интегральном способе измерения применяют термометры, болометры, пироэлектрические приемники.

Основные преимущества фотоэлектрических фотометров – возможность быстрых измерений и применения автоматики для записи и одновременных расчетов (с соответствующим увеличением скорости и объема получаемой информации), сокращение числа наблюдателей, хорошая воспроизводимость при определенных условиях.

Вместе с тем зависимость метрологических характеристик физических приемников от ряда факторов (спектра излучения, уровня получаемого потока излучения, распределения его по поверхности, длительности работы, поляризации света, температуры приемника, его утомления, характера нагрузки, угла падения света, дрейфа нуля, нелинейности и пр.), а также разброс этих характеристик среди образцов каждого выбранного типа приемников являются источниками погрешностей измерений посредством фотоэлектрических фотометров.

Измерение освещенности. Приборы для измерения освещенности (люксметры) в первую очередь должны удовлетворять требованиям хорошего соответствия функции $V(\lambda)$ и обеспечивать правильную

оценку падающего на них излучения в соответствии с косинусом угла его падения.

В настоящее время имеются достаточно хорошие приборы для измерения освещенности с диапазонами измерения от 10^{-4} до 10^5 лк с суммарной погрешностью в зависимости от класса от 3 до 20 %.

Измерение яркости. Между освещенностью E_v на светочувствительной поверхности приемника и распределением яркости L_v имеется следующая зависимость:

$$E_v = \int_{\Omega} L_v d\Omega \cos \varepsilon,$$

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

При ограниченном телесном угле Ω , в пределах которого свет может падать на приемник, средняя яркость в пределах этого угла может быть оценена отношением $\bar{L}_v = E_v / \Omega$.

Среднюю яркость \bar{L}_v в каком-либо направлении можно получить также и как отношение силы света J_v в данном направлении к площади светящейся поверхности, видимой с данного направления A :

$$\bar{L}_v = J_v / A.$$

Существующие в настоящее время измерители яркости с углами обзора (измерительного поля) 2 ... 3° и более в зависимости от класса имеют суммарную погрешность 5 ... 20 %.

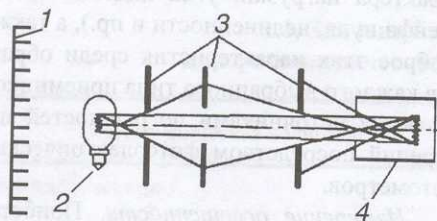


Рис. 1.6. Схема измерения силы света:

1 – черный фон; 2 – источник света;
3 – экраны-диафрагмы; 4 – поверхность входа
света

Измерение силы света. Силу света можно оценить 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

$$J_v = E_v r^2 \cos^{-1} \varepsilon \Omega_0^{-1},$$

где E_v – освещенность элемента поверхности; r – расстояние между источником света и освещенным элементом поверхности; ε – угол падения света на освещенный элемент поверхности; Ω_0 – телесный угол в один стерадиан.

Это соотношение справедливо с достаточной 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.

При определении силы света по фотометрическому закону изменения освещенности с расстоянием нужно следить за тем, чтобы посторонний свет не попадал на чувствительный элемент фотометрической головки (рис. 1.6).

Силу света можно оценить также интегрированием распределения измеренной яркости

$$J_v = \int L_v dA \cos \varepsilon,$$

где J_v – сила света в заданном направлении; A – площадь светящейся поверхности с элементом площади dA ; $L_v(\varepsilon)$ – яркость элемента площади dA в направлении, в котором нужно определить силу света источника света (в направлении ε); ε – угол излучения элемента площади dA между нормалью к его поверхности и направлением, в котором нужно определить силу света J_v .

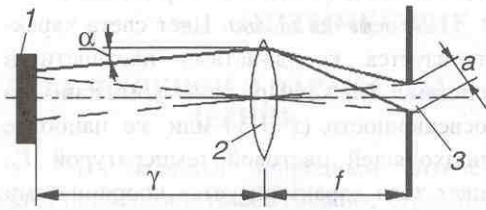


Рис. 1.7. Фотометрическая головка с линзой для измерения силы света путем интегрирования яркости ($D \leq d - ra/f$):
 1 – источник света (с наибольшим размером D);
 2 – линза (с диаметром d); 3 – поверхность входа света (окно или диафрагма с размером a)

Для оценки силы света путем интегрирования яркости используют специальные фотометрические головки, например, с одной линзой (рис. 1.7) или с параллельным включением яркометров (рис. 1.8).

Для определения распределения силы света световых приборов обычно используют такие измерительные установки, как гониофотометры с вращением ис-

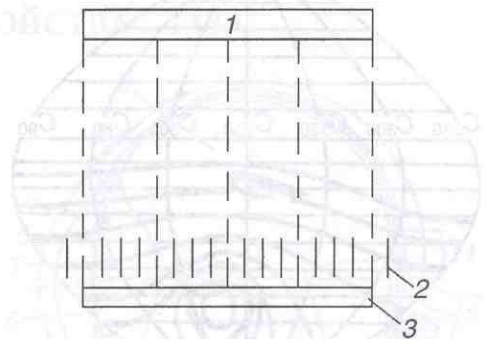


Рис. 1.8. Фотометрическая головка для интегрирования яркости:
 1 – светильник; 2 – тубусы; 3 – параллельно включенные яркометры

точника света, гониофотометры с подвижной фотометрической головкой, гониофотометры с вращающимся зеркалом.

Пространственное распределение силы света обычно представляют в виде кривых распределения силы света в различных системах плоскостей или поверхностей (рис. 1.9 и 1.10).

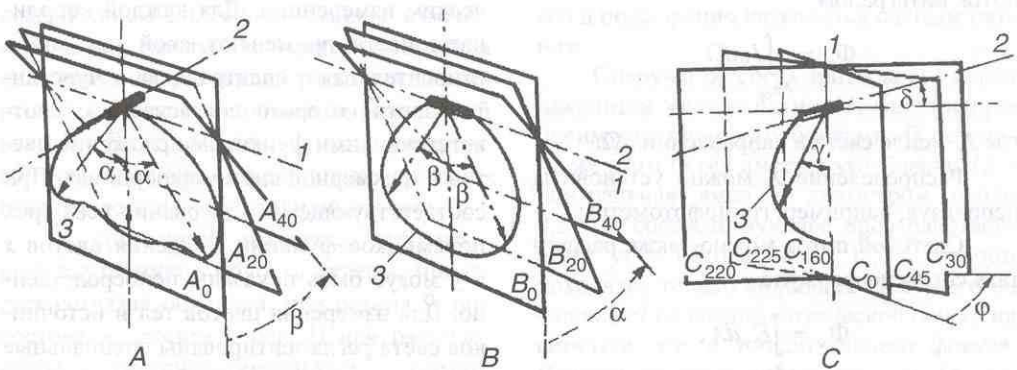


Рис. 1.9. Системы плоскостей A, B и C:
 1 – ось вращения; 2 – ось светильника; 3 – кривая распределения силы света

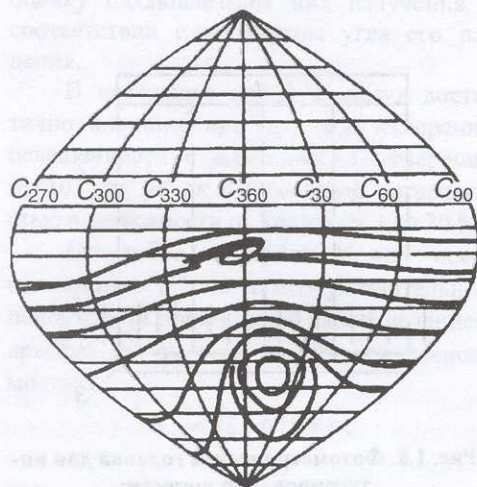


Рис. 1.10. Диаграмма изокандел
(кривых равной силы света)

Измерение светового потока. Световой поток можно оценить путем учета распределения силы света или освещенности, или измерением при помощи светометрического шара, или же по относительному учету измеренных значений освещенности, яркости или силы света.

По пространственному распределению силы света можно оценить световой поток интегралом

$$\Phi_v = \int_{\Delta\pi_{\text{ср}}} J_v d\Omega,$$

где J_v – сила света в направлении $d\Omega$.

Распределение J_v можно установить, используя, например, гониофотометры.

Световой поток можно также рассчитать согласно формуле

$$\Phi_v = \int_A E_v dA,$$

где E_v – освещенность элемента площади

dA ; A – поверхность, охватывающая источник света (частично сферическая).

Измерения цвета. Цвет света характеризуется координатами цветности в системе Международной комиссии по освещенности (x и y) или же наиболее подходящей цветовой температурой T_n ; цвет тела характеризуется координатами цветности x и y и относительной светлотой. Для измерения света применяют спектральный и трехдиапазонный методы.

При спектральном методе измеряемый цветовой показатель (так называемый цветовой стимул) определяют как сумму цветových стимулов по спектру. Измерение складывается из спектрально-фотометрического определения функции цветового возбуждения ϕ_λ , обычно только соответствующей спектральной характеристики (параметра) вещества, и из расчетной обработки измеренных значений (стимулометрической расшифровки). Хотя спектральный метод трудоемок, его можно считать наиболее точным.

При трехдиапазонном методе все три координаты цвета измеряемого цветового стимула определяют фотометрическим измерением. Для каждой координаты цвета применяют свой приемник, относительная спектральная чувствительность которого согласуется с соответствующими функциями сложения цветов в трехмерной системе координат. При соответствующем согласовании всех трех приемников функции сложения цветов x и y могут быть показаны непосредственно. Для измерения цветов тел и источников света регламентированы специальные условия и геометрические измерительные схемы.

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГЛАЗА

2.1. ФУНКЦИИ И ПАРАМЕТРЫ
ЗРЕНИЯ

Глаз является природным оптическим прибором и имеет сложное строение (рис. 2.1). 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.

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 имеется отверстие (зрачок), выполняющее роль диафрагмы. Благодаря действию мышц радужной оболочки диаметр зрачка меняется от 2 до 8 мм.

За радужной оболочкой располагается 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 сосудистой оболочке, заполняющей внутреннюю полость склеры, прилежит 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.

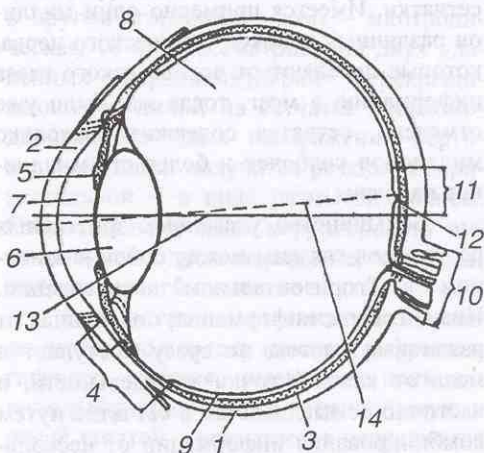


Рис. 2.1. Разрез глаза человека:

- 1 – склера; 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

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° , в котором находятся только колбочки. Центр его не 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 (α), приблизительно равный 5° .

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 человеческого глаза информацию в мозг, тогда как было уже отмечено, сетчатка содержит несколько миллионов колбочек и более ста миллионов палочек.

Большинство указанных зрительных рецепторов связаны между собой в основном в "горизонтальном" направлении. Иначе говоря, информация, полученная от различных клеток, не сразу поступает в мозг от каждой точки в отдельности, а частично осмысливается в сетчатке путем комбинирования информации от нескольких зрительных рецепторов. Важно понять, что сам глаз выполняет часть функций осмысливания, свойственных головному мозгу.

Тот факт, что зрение в темноте осуществляется с помощью палочек, а в окрестности желтого пятна палочек нет, проявляется еще и в том, что мы видим в темноте предметы, находящиеся прямо перед нами, не столь отчетливо, как предметы расположенные сбоку.

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

Хотя мы плохо видим, когда смотрим искоса, одним уголком глаза, тем не менее сразу замечаем летящего сбоку комара или мошку, даже если вовсе не ожидали увидеть что-либо на этом месте.

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 влаги и стекловидного тела. Все эти величины для разных глаз имеют разные значения.

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 расстройстве 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.

Эмметропия, миопия и гиперметропия глаза. При нормальной рефракции, или *эмметропии*, дальняя точка ясного зрения находится в бесконечности. Параллельные лучи после преломления в оптической системе глаза (без участия аккомодации) собираются в сетчатке (рис. 2.2, а).

В системе близорукого, или *миопического* глаза, параллельные лучи после преломления собираются впереди сетчатки, т.е. главный фокус F глаза не совпадает с

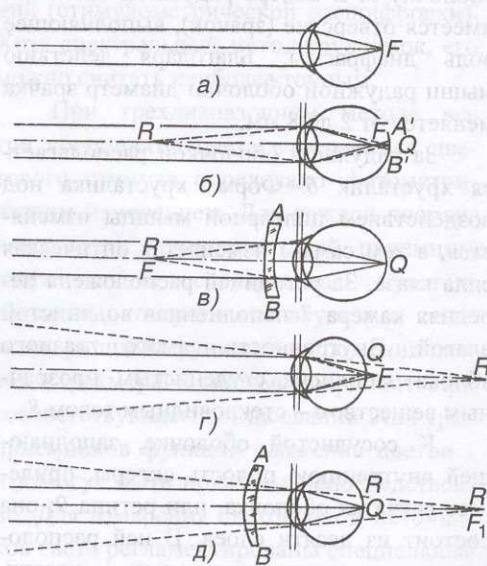


Рис. 2.2. Схема фокусирования лучей: а — эмметропический глаз; б — миопический глаз; в — корригированный миопический глаз; г — гиперметропический глаз; д — корригированный гиперметропический глаз

поверхностью сетчатки и на ней получается кружок рассеяния $A'B'$ (рис. 2.2, б). Это является следствием или большой преломляющей силы глаза, или же чрезмерно большой длины оси глазного яблока, или следствием обеих причин. Для коррекции миопии необходима отрицательная рассеивающая линза AB (рис. 2.2, в).

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 (рис. 2.2, г). Это обуславливается или слабой преломляющей силой глаза, или же слишком малой длиной оси глазного яблока, или следствием обеих причин. Для коррекции гиперметропического глаза необходима положительная собирающая линза AB (рис. 2.2, д).

Астигматизм глаза. В случае эмметропии, миопии или гиперметропии параллельные лучи света после преломления в средах глаза соберутся в одном фокусе, а изображение будет в виде точки.

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

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

По рефракции главных меридианов различают пять видов астигматизма глаза:

- 1) простой миопический – один меридиан эмметропический, а другой – миопический;
- 2) простой гиперметропический – один меридиан эмметропический, а другой – гиперметропический;
- 3) сложный миопический – оба меридиана миопические, но разной степени;
- 4) сложный гиперметропический – оба меридиана гиперметропические, но разной степени;

5) смешанный, или гиперметропический.

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

В рецептах на астигматические линзы первой по порядку пишется рефракция главного сечения, имеющего наименьшую рефракцию. Затем – наибольшую и после запятой – указывается направление главного сечения с наименьшей рефракцией.

Например, в рецепте указано: $-1,5 + 2$ дптр 60° . Это обозначает астигматическую линзу, у которой в одном сечении, установленном на 60° к горизонтали, рефракция $-1,5$ дптр, а в другом сечении, перпендикулярном первому, рефракция $+2$ дптр. Астигматическая разность этой линзы $3,5$ дптр (см. гл. 4).

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

Врожденный астигматизм глаза мало изменяется в течение жизни, иногда передается по наследству; приобретенный – следствие различных операций на глазном яблоке, травм, воспалений и пр.

Аккомодация. Способность глаза приспособливаться к четкому видению различно удаленных предметов называется аккомодацией глаза. Это достигается изменением преломляющей силы хрусталика благодаря изменению радиусов кривизны передней поверхности хрусталика.

На рис. 2.3 показано положение хрусталика без аккомодации при рассматривании точки R , называемой дальнейшей точкой ясного зрения, и под осью – акко-

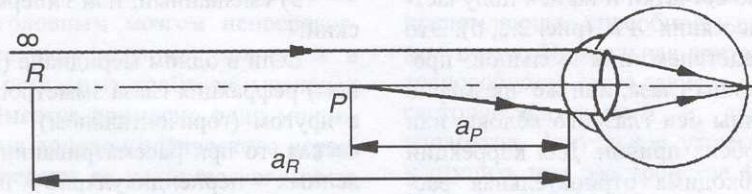


Рис. 2.3. Схема аккомодации глаза человека

модированный хрусталик при рассмотрении точки P , называемой ближайшей точкой ясного зрения. Расстояние между дальнейшей точкой — a_R и ближайшей точкой a_P , выраженное в дптр, называется объемом аккомодации.

При чтении книг или 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 близком расстоянии.

Это явление называется старческой дальнозоркостью, или пресбиопией.

Изменение объема аккомодации с возрастом приводится в табл. 2.1.

Для коррекции пресбиопии у эметропов применяются положительные лин-

зы разной рефракции в зависимости от возраста, а при наличии миопии или гиперметропии — в зависимости от вида и степени рефракции.

Аккомодация отсутствует при афаккии. Афакическим глазом называется глаз, лишенный хрусталика. Чаще всего это наступает после удаления из глаза помутневшего хрусталика, после операции катаракты.

Острота зрения. Остротой зрения, или разрешающей способностью глаза, называется способность глаза различать две точки отдельно друг от друга.

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

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 про-

2.1. Возрастные изменения объема аккомодации

Возраст, годы	Ближайшая точка ясного зрения, мм	Объем аккомодации, дптр	Возраст, годы	Ближайшая точка ясного зрения, мм	Объем аккомодации, 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

межугочная, не раздраженная светом. Способность глаза различать две точки с минимальным углом между ними в 1' считается нормой. Острота зрения (*visus*) такого глаза принимается за 1,0. Для исследования остроты дальнего зрения пользуются таблицами Д.А. Сивцева с кольцами и буквами (рис. 2.4).

Эти таблицы 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 исследование проводится с расстояния 5 м, не-

зависимо для каждого глаза. При изменении расстояния показания будут другие (табл. 2.2).

Для создания равномерной освещенности, таблицы размещают в специальном металлическом ящике вместе с двумя боковыми осветителями, дающими освещенности в 700 лк по всей поверхности таблиц.

Для проверки остроты ближнего зрения широко используется таблица для подбора очков для чтения (рис. 2.5), а в зарубежной практике таблица Егера (рис. 2.6), с текстами соответственно на

$D=50,0$	Ш Б	$V=0,1$
$D=25,0$	М Н К	$V=0,2$
$D=16,67$	Ы М Б Ш	$V=0,3$
$D=12,5$	Б Ы Н К М	$V=0,4$
$D=10,0$	И Н Ш М К	$V=0,5$
$D=8,33$	Н Ш Ы И К Б	$V=0,6$
$D=7,15$	Ш И Н Б К Ы	$V=0,7$
$D=6,25$	К Н Ш М Ы Б И	$V=0,8$
$D=5,55$	Б К Ш М И Ы Н	$V=0,9$
$D=5,0$	Н К И Б М Ш Ы Б	$V=1,0$
$D=3,33$	Ш И К Н М И Ы Б	$V=1,5$
$D=2,5$	И М Ш Ы Н Б М К	$V=2,0$

Рис. 2.4. Таблица Д.А. Сивцева с буквами

№1 (острота зрения 1,0)

НЕ ОБИДНАЯ ВПЕЧАТЛЕНИЕ ТО, ЧТО КОГДА-ТО ВОЗДУХ ВЕТРА, РАССЛАБЛЕН ЧЕ-
МЫ, ПОНЕЖЕ ЕГО ВОЗДУШНОЕ ДАВЛЕНИЕ ИЛИ ВОЗДУШНОЕ ДАВЛЕНИЕ
В ПЛОТНОСТИ ВОЗДУХА, ТАКИМ ОБРАЗОМ ПОСЛЕ ТОЙ, КОГДА ПОСЛЕ
ГОЛОМОРЫ ТРАВА, ВЫСЫСАЕТ ПОСЛЕ ТОЙ, КОГДА ПОСЛЕ
ДЕЛАЕТ МАСТЕРСКОЙ ПОСЛЕ ТОЙ, КОГДА ПОСЛЕ

№2 (острота зрения 0,9)

С МОРЕМ ДАЛЬШЕ КОГДА-ТО ВЕТРА, РАССЛАБЛЕН ПО СТЕПЕ ВДЫМА-
ННОЕ МЕЛКОЕ ПЕЩЕ РАБЕТАЕТ НА БЕРЕГ ВОЗДУХ И ШЕЛЕСТЬ ПЕЩЕ
ТАКИМ ОБРАЗОМ ПОСЛЕ ТОЙ, КОГДА ПОСЛЕ ПЕЩЕ РАБЕТАЕТ НА БЕРЕГ
ЖЕЛТЫЕ ЛИСТЬЯ И ВДОХАЕТ НА В ОСТРЕ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ
ИЛИ ШЕЛЕСТЬ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ

№3 (острота зрения 0,8)

ГОЛОМОРЫЕ ОТ ПЛЫИ ГОЛОМОРЫЕ КОГДА-ТО НЕБО МУЖНО, ЗАР-
ЖЕ СОЛНЦЕ СМОТРИТ В ЗЕМНОМОРЫЕ МОРЕ, ТОЧНО СВОБО-
ТОЧНОЮ СЕРЦУ ВЛАДЬ СНО ПОЧТИ НЕ ОТРАЖАЕТСЯ В ВОДЕ, РАС-
СОБЕЖНОЙ УДАМИ ВСЕЛ, ПАРКОЖИВЫЕ ВИНТОВ, ОСТРЫМИ КИ-
ТАНГЕ МЕРШ ОШЕРАЩЕКА ВУЧУЧЕ И ШАДЬ В

№4 (острота зрения 0,7)

НА ДАЛЕКОЕ ПРОСТРАНСТВО ОТ БЕРЕГА С МОРЕ РАБЕТАЕТ
МАЛЫЕ С РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ
ОТРАЖАЛО ОГНИ ФОНАРИ И БЫЛО ЧЕРНО МАССОЙ ЖЕЛ
ИЛИ ШЕЛЕСТЬ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ РАБЕТАЕТ

№5 (острота зрения 0,6)

ЗВОН ЯКОРНЫХ ЦЕПЕЙ, ГРОХОТ СЦЕПЛЕНИЙ ВАГОНОВ, ПОДВОЗЯЩИХ ГРУЗ, МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ВОЛГЛ ЖЕЛЕЗНЫХ ЛИ-
СТОВ, ОТКУДА-ТО ПАДАЮЩИХ НА КАМЕНЬ МОСТОВОЙ, ГАУХОЙ СТУК ДЕРЕВА, ДРЕБЕЗЖАНИЕ ИЗВОЗЧИКОВ ТЕЛЕГ,
СВИСТКИ ПАРХОДАВ, ТО ПРОНИЗАТЕЛЬНО РЕЗКИЕ, ТО ГАУХО РЕВУЩИЕ, КРИКИ ГРУЗЧИКОВ, МАТРОСОВ И ТАМОЖЕН-
НЫХ СОЛДАТ-ВСЕ ЭТИ ЗВУКИ СЛИВАЮТСЯ В ОГУЛШИТЕЛЬНУЮ МУЗЫКУ ТРУДОВОГО ДНЯ И, МЯТЕЖНО ДОВОЖАЯСЯ,

ФЫ АВ П РА О Д Ж Ш Т Г И Н М Е С К Ч У Я Й С Е Т З И М

№6 (острота зрения 0,5)

...ГРУЗНЫЕ ТУЧИ МЕДЛЕННО ПОЛЗУТ НАД СОННОЙ РЕКОЙ, КАЖЕТСЯ, ЧТО ОНИ СПУСКАЮТСЯ
ВСЁ НИЖЕ И НИЖЕ. КАЖЕТСЯ, ЧТО ВДАЛИ ИХ СЕРЫЕ ЛОХМОТЬЯ КОСНУЛИСЯ ПОВЕРХНОСТИ БЫ-
СТРЫХ И МУТНЫХ ВЕСЕННИХ ВОЛН, И ТАМ, ГДЕ ОНИ КОСНУЛИСЯ ВОДЫ, -ВСТАЛА ДО НЕБЕС НЕ-
ПРОНИЦАЕМАЯ СТЕНА ОБЛАКОВ, ЗАГРАДИВШАЯ СОБОЮ ТЕЧЕНИЕ РЕКИ И ПУТЬ ПЛОТАМ, И ВОЛНЫ

Р П М И Т Ь Л Д Ъ Ю З Щ Ц Ж О Г Н А М С Ч О К П Н У В Ч Й

№7 (острота зрения 0,4)

В КРАЙНЕЕ ОКНО МАСТЕРСКОЙ ПОСЛЕ ПОЛУДНЯ МИНУТ ДВАДЦАТЬ СМОТРИТ
СОЛНЕЧНЫЙ ЛУЧ. СТЕКЛО, РАДУЖНОЕ ОТ СТАРОСТИ, СТАНОВИТСЯ КРАСИВЫМ
И ВЕСЕЛЫМ. В ОТКРЫТУЮ ФОРТОЧКУ СЛЫШНО, КАК ВЗВИЗГИВАЕТ ЖЕЛЕЗО ПЕ-
ЛОЗЕНВ, ПОПАДАЯ НА ОГОЛЕННЫЙ КАМЕНЬ МОСТОВОЙ, И ВСЕ ЗВУКИ УЛИЦЫ

Х Я Ф Ж Ы Д В Л А Р П Н И С У Т Ч Ь Я Б Ч Ю З Н Ш Э З У О Й У

№8 (острота зрения 0,3)

ЧЕМ ДАЛЬШЕ К МОРЕ, ТЕМ ВСЁ ШИРЕ, СПОКОЙНЕЙ ВОЛ-
ГА. СТЕПНОЙ ЛЕВЫЙ БЕРЕГ ТАЕТ В ЛУННОМ ТУМАНЕ. ОТ
ГЛИНИСТЫХ ОБРЯВОВ ПРАВОГО НА РЕКУ ЛЕГЛИ ГУСТЫЕ
ТЕНИ, И КРАСНЫЕ, БЕЛЫЕ ОГОНЬКИ БАКЕНОВ ОСОБЕННО
Ц Ш О А Э Ь Т О С Е К А П Ы У В Е Ч Ы Й Н А Я Т О Л Б

№9 (острота зрения 0,2)

СНАЧАЛА МЫ СЛЫШАЛИ И ШЕЛЕСТ
ЛИСТВЫ ВОКРУГ, И ВСПЛЕСКИ ВОДЫ В
ОЗЕРЕ, ЧУВСТВОВАЛИ ПОД СОБОЙ ЗЕМ-
ЛЮ... ПОТОМ ПОСТЕПЕННО ГОЛУБОЕ НЕ-
Е А Н П Р И М К В С Ч У Ы Й Ф Я Л Э Щ

№10 (острота зрения 0,1)

ПЛОТЫ ПЛЫЛИ ДАЛЬШЕ
Р П Л В А Н И М С Б Н

Рис. 2.5. Таблица для исследования остроты зрения и для подбора очков для чтения

2.2. Острота зрения при исследовании по таблицам Д.А. Сивцева с разных расстояний

Острота зрения по таблицам с расстояния 5 м	Расстояние от таблиц, м									
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
0,1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
0,2	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2
0,3	0,03	0,06	0,09	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,27	0,3
0,4	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,24	0,28	0,32	0,36	0,4
0,5	0,05	0,1	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
0,6	0,06	0,12	0,18	0,24	0,3	0,36	0,42	0,48	0,54	0,6
0,7	0,07	0,14	0,21	0,28	0,35	0,42	0,49	0,56	0,63	0,7
0,8	0,08	0,16	0,24	0,32	0,4	0,48	0,56	0,64	0,72	0,8
0,9	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,9
1,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1,5	0,15	0,3	0,45	0,6	0,75	0,9	0,05	1,2	1,35	1,5
2,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0

русском и английском языках, сгруппированными по возрастанию размера букв. Каждая группа содержит несколько строк из черных букв.

При проверке зрения с применением этих таблиц проверяемый должен прочесть, например, самый мелкий текст с расстояния не менее 30 см. Каждый глаз должен проверяться индивидуально, тогда как другой глаз должен быть заэкранирован от таблицы, но не защищен от окружающего света. (Все таблицы и рисунки даны в уменьшенном виде).

Поле зрения. 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°, 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.

Биокулярное зрение. Биокулярное 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 орбитах и принимают нужное положение (рис. 2.7). Вращение глаз вокруг центра осуществляется благодаря работе глазных мышц. Такое изменение положения осей называется конвергенцией. Угол, составляемый

aliza near vision chart

No. 1 (J1)

There is nothing in all of nature more perfect or more beautiful than the rose. Nothing demands less and gives more. First a small larva comes of stone and about the rose remains the emblem with pure beauty and great delight. Larva is filled with matter about the rose. Honey are written about it. After eating one rose, the memory of it stays long in the mind.

No. 2 (J2)

Outside, on the branch, starting from a small, almost invisible bud, the rose slowly begins to open its petals. The bud grows daily until it reaches opening size. Then, slowly and carefully, with the warmth of the sun and the water of the earth to help it, the petals unswirl and reach out toward the sun.

No. 3 (J3)

The rose unfolds its glory. The perfume that has been gathering inside is released and fills the air. The velvety petals grow and soon reach their peak and exclaim, "I am the rose. In all of Nature there is nothing more perfect."

No. 4 (J4)

The mature rose waits for bees and flying insects that will take the pollen from one blossom and put it on another rose.

No. 5 (J6)

Its perfume attracts the insects; its thorns protect it from those who may harm it. When the pollen has been put on another rose, the petals slowly begin to fade.

No. 6 (J8)

The perfume loses its power, and the rose dies. Inside the rose that received the pollen, seeds that will grow other roses begin to develop.

No. 7 (J10)

Indoors, the rose is one of Nature's delights, unfolding its hidden beauty.

No. 8 (J12)

Its perfume fills the room.

Note: Vision should be measured at 14 inches. If customarily worn, reading glasses should be used.

PUPIL GAUGE



Рис. 2.6. Таблица Егера

зрительными осями глаз, называется углом конвергенции. Величина угла зависит от положения объекта a , b , c и расстояния между точками Z_1 и Z_2 , вокруг которых вращаются глаза.

Центр вращения глаз Z_1 и Z_2 , находится примерно на расстоянии 13 мм от вершины роговицы.

Поле зрения, видимое одновременно обоими глазами и называемое бинокулярным, составляет около 120° . Глазной базис

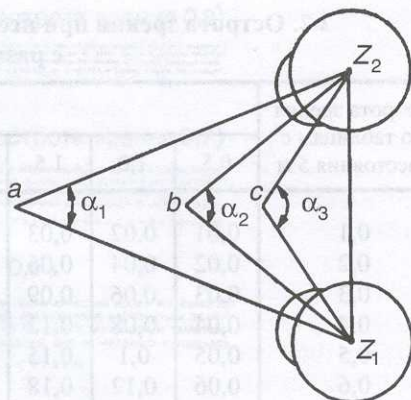


Рис. 2.7. Угол конвергенции

(расстояние между осями глаз) для различных людей колеблется в пределах от 52 до 72 мм. Максимальный угол конвергирования — 32° .

Для правильного бинокулярного зрения необходимо, чтобы мышцы, вращающие оба глаза, функционировали нормально. Если это не осуществляется, возможно развитие, так называемой, мышечной астиопии, или скрытого косоглазия, которое в дальнейшем может стать постоянным.

Бинокулярное зрение может нарушаться и при анизометропии, когда рефракция обоих глаз различна. При небольшой разнице в рефракции обоих глаз до 3,0 дптр и при тщательной коррекции бинокулярное зрение сохраняется.

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.

Под остротой стереоскопического зрения понимают точность оценки взаимного расположения предметов по глубине. Оценка глубины пространства происходит в результате различия перспектив, видимых обоими глазами. Условиями, влияющими на способность глаза ощущать глубину (стереоэффект), являются:

яркость фона, контрастность объектов по отношению к фону и к друг другу, форма и толщина объектов, расстояние между ними.

Адаптация глаза и его пороговая чувствительность. Адаптацией называется способность глаза приспосабливаться к различным условиям освещенности. Различают световую (дневную) и темновую (ночную, сумеречную) адаптацию. Понижение чувствительности 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. Одновременно зрительный пурпур, покрывающий палочки, полностью разлагается и палочки не действуют. Изображение воспринимают колбочки, которых от яркого света защищают пигментные зерна.

Повышение чувствительности глаза при световом раздражении называется темновой адаптацией. При слабых яркостях работают только палочки, поэтому снижается острота зрения и цветочувствительность.

Световая чувствительность глаза характеризуется наименьшим количеством световой энергии, могущей вызвать световое раздражение, и соответствует абсолютному световому порогу. Величина абсолютного светового порога глаза очень мала и колеблется у разных людей от $5 \cdot 10^{-19}$ Дж/с 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 10 000 раз. Процесс адаптации требует времени (при резких изменениях освещенности до 1 ч). При точных измерениях необходимо создать нормальную освещенность в пределах от 50 до 250 лк.

Образование и восприятие цвета. Все цвета можно делить на ахроматические и хроматические. К первой категории относят черный и белый цвета и промежуточную между ними гамму серых тонов.

Истинно нейтрально-серый тон может быть получен при ослаблении яркости белого цвета без изменения спектрального состава.

Резкой границы между ахроматическими и хроматическими цветами не существует. Наблюдается много цветов с едва различимым цветовым оттенком. Вместе с тем у других цветов интенсивность может быть очень сильно выражена. Эта особенность — одно из характерных свойств цвета и называется *насыщенностью*.

Хроматические цвета воспринимаются и отличаются друг от друга 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, — таких тонов глаз различает около 30. Следовательно, он может воспринимать 180 цветовых тонов. Изменение цветности наиболее хорошо ощущается в следующих областях спектра: в зелено-голубой ($\lambda \approx 495$ нм), оранжево-желтой ($\lambda \approx 585$ нм), и оранжево-красной ($\lambda \approx 640$ нм).

Известно, что цвета, даже одинаковые по цветовому тону, могут казаться в зависимости от условий наблюдения 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 у таких тел будет зависеть от λ . Поэтому для сравнения следует руководствоваться светлотой соответствующих серых тонов. Приблизительное представление о светлоте цветных поверхностей дает табл. 2.3, где приведены коэффициенты отражения равных

по светлоте ахроматических поверхностей.

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

Преимущество введения в практику цветоведения трех основных характеристик цвета особенно обоснованно тем, что этим путем создается возможность не только качественной, но и количественной оценки цвета.

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 λ (наибольшая чувствительность лежит в области желто-зеленых лучей около $\lambda \approx 555$ нм). В обе стороны, к красному и фиолетовому концам спектра, чувствительность резко падает.

На рис. 2.8 показана кривая относительной яркости (светлоты) лучей спектра одинаковой интенсивности, – она носит название *кривой видности*. Эта кривая показывает, что при одинаковой интенсив-

ности 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 одинаковыми по цвету, могут обладать совершенно разным спектральным составом, а цветовое ощущение определяется тремя переменными – цветовым тоном, насыщенностью и светлотой.

В основу учения о цветовых ощущениях положены опыты по смешению цветов, т.е. составлению сложных цветов из некоторых основных.

Наиболее совершенные результаты достигаются, если принять в качестве основных два крайних цвета спектра – красный и фиолетовый – и один в средней области – зеленый ($\lambda = 540$ нм). При

2.3. Коэффициенты отражения цветных поверхностей

Поверхность	Коэффициент отражения
Черная	0,04
Темно-синяя	0,10
Темно-красная	0,10
Темно-серая	0,15
Зеленая	0,16
Оранжево-красная	0,23
Голубая	0,45
Желтая	0,55
Белая	0,70 ... 0,90

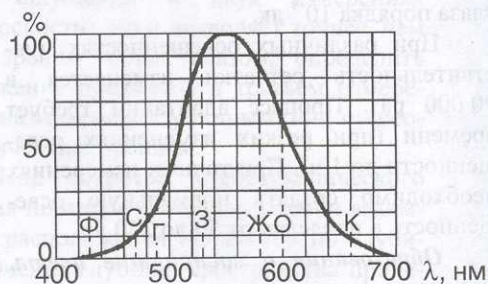


Рис. 2.8. Кривая изменения относительной яркости лучей спектра одинаковой интенсивности (кривая видности)

смещении этих основных цветов в надлежащих пропорциях могут быть получены цвета всех цветовых тонов. Сложные цвета при смешении трех основных будут совпадать по цветовому тону с чисто спектральными, но отличаться меньшей насыщенностью, причем никакой выбор трех исходных цветов не позволяет получать производные цвета в их полной насыщенности.

Возможность получения всех цветов из трех основных, естественно, вызывает предположение, что и в глазу человека цветовое ощущение создается в результате суммирования трех элементарных процессов под действием красных, зеленых и сине-фиолетовых лучей. 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 выяснении распределения по длинам волн возбуждений в глазу человека. Наиболее надежные экспериментальные данные по решению этой задачи принадлежат Н.Т. и В.И. Федоровым, которые построили кривые основных возбуждений (рис. 2.9). Из этих данных следует, что максимум спектральной чувствительности глаза в коротковолновой области падает на $\lambda \sim 480$ нм, в средней части – на $\lambda \sim 550$ нм и в длинноволновой части – на $\lambda \sim 580$ нм.

Аномалии в восприятии цвета.

Термин "цветовая слепота" часто неправильно употребляется для обозначения отклонений от норм в восприятии цвета. В абсолютном смысле цветовой слепотой должно называться полное отсутствие ощущения цвета. Поскольку обычно, так называемый "цветно-слепой", все же ощущает некоторые цвета, следует правильнее называть это явление не слепотой, а "цветовой недостаточностью".

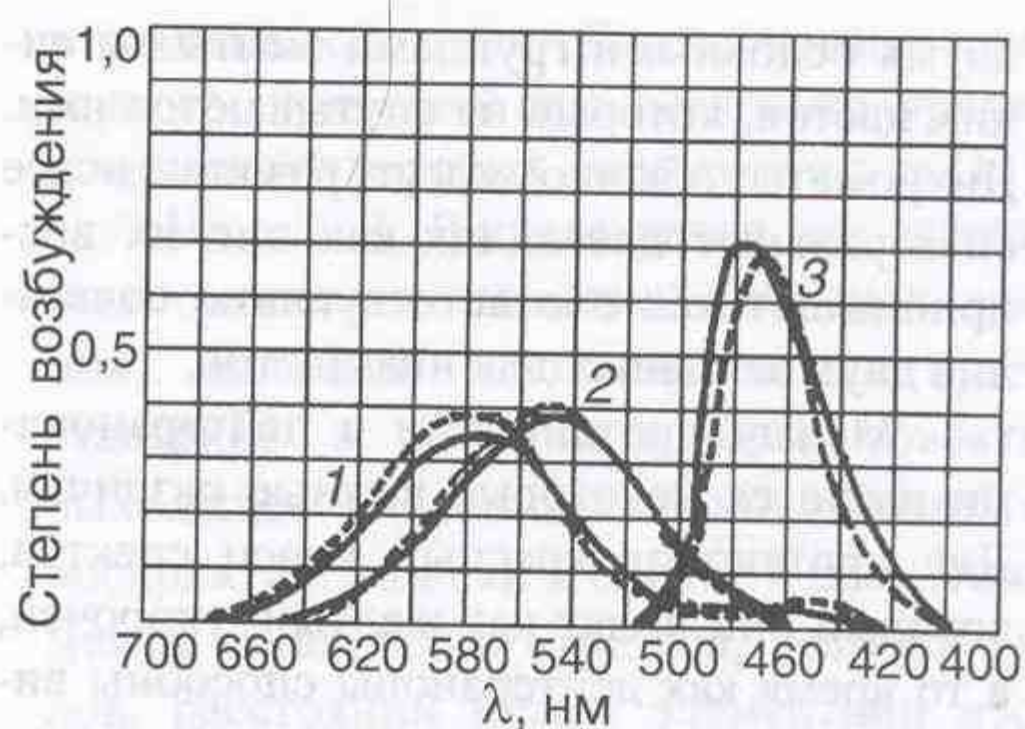


Рис. 2.9. Кривые основных возбуждений глаза:

- 1 – красноощущающий;
- 2 – зеленоощущающий;
- 3 – синеощущающий элементы;
- — — — дневное зрение;
- - - - - ночное зрение

Нормальным цветовым зрением обычно считают трихроматизм, т.е. способность различать три основных цвета. Однако и среди "трихроматов" имеются люди, слабо различающие цвета; отклонение их цветового зрения от нормы может быть настолько незначительным, что лишь очень тонкие испытания способны его обнаружить. Наибольшая часть людей со слабым цветовым зрением страдает именно этим видом отклонения от нормы, который называется "аномальным трихроматизмом". Опираясь также на три первичных цвета при различении спектральных цветов, аномальный трихромат видит их в отклоняющихся от нормы количественных соотношениях. Слабое цветовое зрение почти всегда явление наследственное. Оно присуще в какой-то степени приблизительно 8 % мужчин. У женщин слабое цветовое зрение встречается очень редко.

Следующая часто встречающаяся форма недостаточности цветового зрения – это красно-зеленый дихроматизм. Дихроматы делятся на две главные подгруппы – протанопы ("красно-слепые") и дейтеранопы ("зелено-слепые"). Для всех дихроматов видимый цвет ограничен

двумя основными группами желтых и синих цветов, которые не спутываются ими. Дихроматы обычно могут различать все спектральные цвета, так как они их воспринимают как соответствующие сочетания двух основных для них цветов.

Между протанопами и дейтеранопами имеются некоторые важные различия. Для протанопов красный конец спектра, который они видят как желтый, укорочен, в то время как дейтеранопы способны видеть на красном конце оттенки (хотя опять-таки желтые) за пределами нормально видимого спектра. Протанопы воспринимают цвета с длиной волны около 493 нм как серые и не могут отличить красный или сине-зеленый от серого. Для дейтеранопов нейтральная область лежит около 500 нм и они не могут отличить зеленый или красновато-пурпурный от серого. Эти различия невелики, но устойчивы в том отношении, что они всегда могут служить средством различения двух типов дихроматов.

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.

Смещение цветов. В этой области цветоведения долгое время существовала путаница понятий – оптическое (аддитивное) смешение цветов не различалось от смешивания окрашенных сред. Ясность в эту область была внесена Гельмгольцем. Получение сложного цвета из простых носит название *синтеза цвета*.

Дополнительные цвета. Ощущение белого цвета достигается путем смешения всех спектральных цветов в таком соотношении, в каком они содержатся в белом цвете. Тот же результат может быть получен, если оптически смешивать попарно определенные хроматические цвета. Цвета таких пар, которые при определенном соотношении дают белый цвет, получили название *дополнительных*.

Дополнительными цветами могут быть не только монохроматические, но и сложные цвета, составленные из лучей различных длин волн.

2.2. ОБРАБОТКА СЕНСОРНЫХ СИГНАЛОВ В МОЗГЕ ПРИ ЗРИТЕЛЬНОМ ВОСПРИЯТИИ

Зрение далеко не так просто, как это кажется иному, полагающему, что достаточно иметь глаза, чтобы видеть какое-либо изображение. Не испытывал ли каждый из нас того, что сильно задумавшись о чем-нибудь, мы ничего не видим, потому, что не даем себе отчета о происходящем перед нашими глазами.

Можно утверждать, что между раздражением и ощущением, нет однозначной и неизменной связи. Значит, недостаточно иметь глаза и воспринимать на их сетчатке изображение, но необходимо еще провести некоторую переработку раздражения в мозге.

Другими словами – чтобы действительно видеть, особенно при визуальном контроле ответственной продукции, недостаточно только видеть, но надо понимать, что видишь. Правда, эта умственная переработка информации происходит очень быстро и так привычна, что человек ее обыкновенно не замечает. Но если зрительное восприятие происходит в непривычных условиях или при обстоятельствах, когда человек не успевает правильно оценить то, что находится в поле зрения глаз, то он или не воспринимает изображение, или обманывает себя относительно того, что рассматривает.

Исследования процессов опознания разных свойств зрительного изображения у человека показали, что его зрительная система (глаз-мозг) при опознании работает быстро и удачно только тогда, когда он тренировался в поиске и расшифровке интересующих его изображений.

Если же задачи поиска и опознания непривычна для него, то он почти всегда решает их неудачно.

Так, давно было замечено, что многих горожан удивляла способность жителей степных районов рассматривать очень отдаленные предметы. Острота зрения их такова, что они могут различить очень далеко, например, всадника там, где городской житель не видит ничего. На самом деле, в поле зрения как у одних, так и у других, очень часто находились одни и те же объекты, но жители степей приучили себя постоянной тренировкой к ясному опознаванию отдаленных объектов, а городские – в основном рассматривают только изображения близких предметов (в транспорте, метро, витрины).

Другой пример. В одном из исследований, проведенных в США, было установлено: наблюдатели могут определить, что на фотографии изображен Джон Кеннеди, даже если изображение очень сильно искажено. Это объясняется тем, что черты лица Кеннеди хорошо знакомы всем наблюдателям. Этот вывод совпадает с выводом другого исследования, где показано, что, если сумма предварительных знаний об опознаваемых лицах мала, отношение правильных ответов к неверным равно 2 : 9, тогда как при хорошем знании сфотографированных лиц это отношение изменяется на 11 : 1.

Можно утверждать, что между раздражением и ощущением нет однозначной

и неизменной связи. Для пояснения сказанного, приведем еще несколько примеров, часть из которых заимствована из [13].

На рис. 2.10 представлен ряд известных оптических иллюзий (обманов зрения). Иллюзии – это неадекватное представление о воспринимаемом объекте, выходящее за границы обычных ошибок восприятия: 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.

За немногими исключениями удовлетворительные объяснения конкретных причин, вызывающих появление оптических иллюзий, отсутствуют. Среди них на рис. 2.10 – иллюзия неравенства длин отрезков, иллюзия непараллельности прямых, иллюзия неравенства диаметров окружностей (круг, который окружен большими кругами, кажется меньше круга, окруженного 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 (психологический закон контрастов).

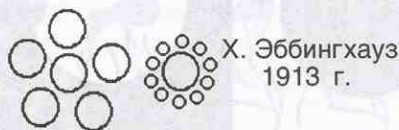
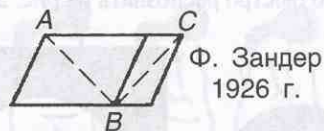
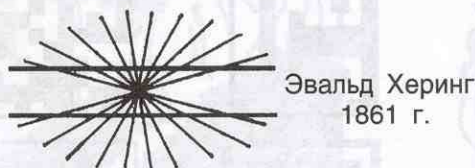
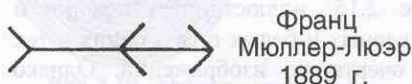
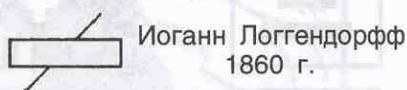


Рис. 2.10. Оптические иллюзии

К оптическим иллюзиям относятся также обманы зрения, вызванные явлением иррадиации; рис. 2.11 – явление кажущегося увеличения размеров белых (светлых) элементов изображения на черном (темном) фоне (при сравнительно большой яркости белого элемента) или, наоборот, кажущееся уменьшение размеров черных объектов на белом фоне.

Величина иррадиации растет при увеличении яркости светлого фона или светлого элемента. Иррадиация обусловлена оптическими недостатками глаза (абберацией – сферической и хроматической), дифракционными явлениями глаза, а также несовершенной установкой глаза на рассматриваемые элементы изображения.

В жизни каждого встречаются случаи, когда он своим воображением дополняет изображение деталями, отсутствующими в рассматриваемой картине (феномен образа). Так, на рис. 2.12 виден лоб, нос и подбородок, хотя они полностью и не изображены; на рис. 2.13, *а* видна несуществующая окружность; на рис. 2.13, *б* видна буква А, очерченная параллельными тонкими линиями, часть из которых не представлена на этом рисунке; на рис. 2.14 легко прочесть **ПЕРВЫЙ ШАГ**, хотя каждая буква изображена не полностью.

Рис. 2.15 иллюстрирует поворот и замену черных и белых полей одних и тех же по очертанию изображений. Однако поворот и однозначную такую же замену трудно быстро распознать на рис. 2.15, *а, б*.

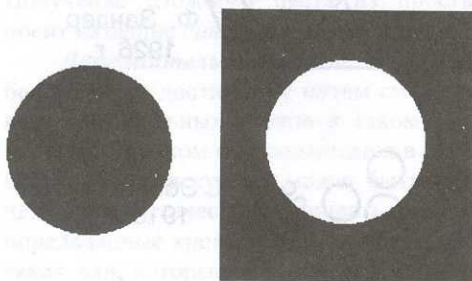


Рис. 2.11. Иллюзия, вызванная иррадиацией



Рис. 2.12. Дополнение (дистраивание) образа

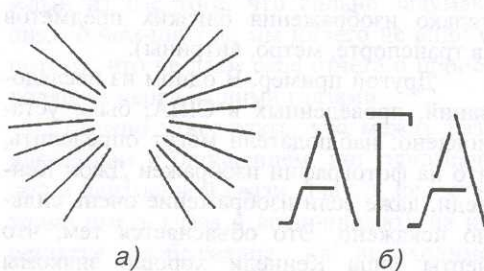


Рис. 2.13. Дополнение (дистраивание) образа

ПЕРВЫЙ ШАГ

Рис. 2.14. Дополнение (дистраивание) образа

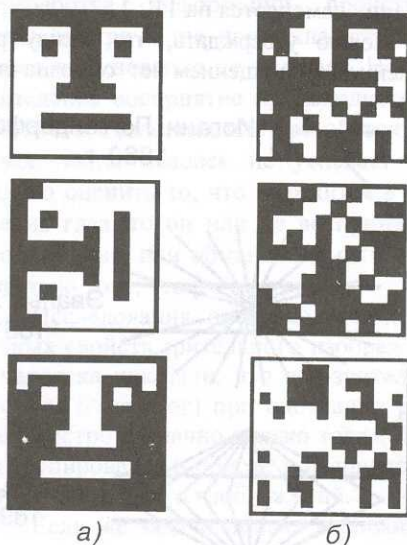


Рис. 2.15. Феномен образа:

а – положительный; *б* – отрицательный



Рис. 2.16. Кубок и пара лиц

Это доказывает то, что за распознавание зрительного образа отвечают не только глаза. Так, например, в зависимости от выбранного фона (черного или белого) на рис. 2.16 наблюдатель видит или пару лиц, или кубок. Рассматривая картину, представленную на рис. 2.17, мы различаем то молодую, то старую женщину. Рис. 2.18 иллюстрирует стереоскопически двусмысленные фигуры.

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.



Рис. 2.17. Картинка с секретом

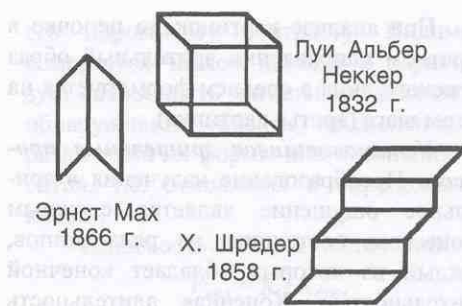


Рис. 2.18. Книга, куб и лестница

Известен также феномен последействия зрительного образа. Так, если достаточно пристально смотреть на рис. 2.19, а 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. 2.20), 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. 2.19. Эффект последействия

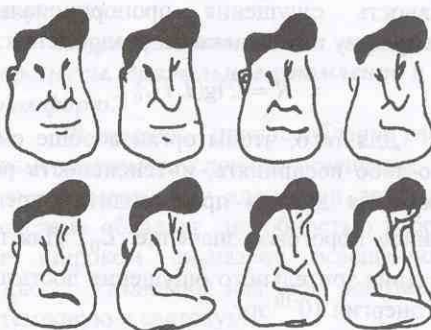


Рис. 2.20. Гистерезис при распознавании образов

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

Установившиеся зрительные процессы. Преобразование излучения в зрительное ощущение является сложным процессом, состоящим из ряда этапов, каждый из которых обладает конечной длительностью. Конечная длительность элементарных актов преобразования излучения в ощущение определяет инерционность зрительного анализатора.

Временные характеристики зрительного процесса определяются также изменением чувствительности анализатора при переходе от одного уровня возбуждения на другой. Эти свойства зрительного анализатора приводят к сложной нелинейной зависимости между уровнем зрительного ощущения — светлотой и яркостью излучения, действующего на глаз. Однако в случае достаточно длительного действия на глаз постоянных по яркости и спектральному составу излучений наблюдается стабильное взаимно-однозначное соотношение между уровнями ощущения и возбуждения. При этом в условиях дневного и ночного зрения светлота будет определяться функциями относительной спектральной чувствительности глаза, а в условиях сумеречного зрения — эквивалентной яркостью.

В 1850 г. Фехнером открыт закон, подтвержденный психологическими экспериментами, утверждающий, что интенсивность ощущения пропорциональна логарифму интенсивности раздражения:

$$R = C \lg(L/L_0).$$

Для того, чтобы орган вообще смог что-либо воспринять, интенсивность раздражения должна превосходить определенное пороговое значение L_0 . Для появления зрительного ощущения достаточно энергии 10^{-10} эрг.

Наряду с законом Фехнера существует закон Вебера, который гласит, что

разрешающая способность, т.е. способность воспринимать отдельно два различных раздражения, пропорциональна интенсивности раздражения. Вебер сформулировал его впервые в 1884 г. для чувства осязания. Если через L обозначить интенсивность раздражения, а через δL — минимальное изменение раздражения, которое приводит к еще улавливаемому различию ощущений, то закон Вебера утверждает, что

$$\delta L = rL, \text{ или } \delta(\ln L) = r.$$

Таким образом, в логарифмической шкале, которую в соответствии с законом Фехнера нужно взять для интенсивности раздражения, разрешающая способность оказывается постоянной, как только раздражение превзойдет пороговое значение.

Значения безразмерной величины r распределены в широкой области и зависят от рассматриваемого ощущения и индивидуальности испытуемого. Ниже приведены минимальные значения для особенно "тонко чувствующих" испытуемых:

яркость света $r \approx 0,015$,

вес $r \approx 0,019$,

длина отрезков $r \approx 0,025$,

вкус $r \approx 0,25$,

громкость звука $r \approx 0,03$,

запах $r \approx 0,35$,

высота звука $r \approx 0,003$.

Воспринимаемая интенсивность раздражения от порогового значения до границы болевого ощущения для большинства видов раздражений лежит в весьма широких пределах, для описания которых приходится привлекать 10 в большой степени, например:

для яркости $1:10^{14}$,

для громкости звука $1:10^6$,

для высоты звука $1:10^3$.

Так как для двух максимально близких еще отличимых друг от друга интенсивностей раздражения L и L' , согласно закону Вебера, справедливо соотношение

$$L = (1+r)L',$$

то отсюда вытекают следующие верхние оценки для общего количества различных между собой интенсивностей раздражения:

- степеней яркости 2^{11}
- степеней громкости 2^9
- высот звука 2^{11}

Абсолютным порогом или пороговой яркостью называют минимальную яркость объекта $L_{пор}$, обеспечивающую его обнаружение с заданной вероятностью p на фоне с коэффициентом отражения $\rho_{\Phi} = 0$ или появление (исчезновение) объекта на том же фоне.

Если объект находится на освещенном фоне, то минимальную разность яркостей $\Delta L_{пор}$ объекта L_0 и фона L_{Φ} , обеспечивающего обнаружение объекта с заданной вероятностью p или появление (исчезновение) объекта, называют разностным порогом (пороговой разностью яркостей)

$$\Delta L_{пор} = \pm(L_0 - L_{\Phi}).$$

Дифференциальным порогом или пороговым контрастом называют отношение пороговой разности яркости к яркости фона

$$K_{пор} = \Delta L_{пор} / L_{\Phi}.$$

Величина, обратная пороговой разности яркости, называется контрастной чувствительностью.

Задачу обнаружения объекта на фоне с яркостью L_{Φ} можно рассматривать как выделение сигнала из шума. При этом шум создается как квантовыми флуктуациями светового потока, так и собственными шумами зрительной системы (спонтанное разложение зрительных пигментов в фоторецепторах, спонтанные разряды в нервных волокнах и т.д.) и присутствует всегда, а сигнал может быть или не быть.

Для определения порогов используются в основном два метода их измерения: метод пределов и метод постоянных стимулов.

Видимость объекта – отношение контраста объекта наблюдения с фоном к

его пороговому контрасту. Видимость измеряется числом порогов и характеризует способность зрительного анализатора обнаруживать объекты наблюдения без различения их формы или опознания объектов, т.е. отношения к определенному классу.

Видимость объекта наблюдения

$$V_{вид} = K / K_{пор},$$

где K и $K_{пор}$ – контраст с фоном и пороговый контраст объекта наблюдения с вероятностью обнаружения $p = 0,5$.

Видимость одноцветного с фоном объекта предлагается оценивать следующим выражением

$$V_{вид} = \lg(10K / K_{пор}).$$

Максимальное значение видимости объекта будет иметь место при таких же условиях освещения, когда он имеет минимальный пороговый контраст

$$V_{вид\ max} = \lg(10K / \xi),$$

где ξ – минимальное значение порогового контраста при соответствующей ему яркости $K_{опт}$.

Для оценки условий освещения рекомендуется пользоваться относительной видимостью

$$V_0 = V_{вид} / V_{вид\ max}.$$

Определение видимости объекта с заданной вероятностью обнаружения p проводится по пороговому контрасту, найденному с такой же вероятностью обнаружения.

Неустановившиеся зрительные процессы. Зрительное утомление и дискомфорт.

Адаптация – приспособление глаза к изменившимся условиям освещения. Благодаря механизму адаптации зрительная система обладает способностью работать в широком диапазоне освещенностей зрачка. Различают два вида адаптации – темновую и световую.

Темновая адаптация – приспособление глаза к работе в условиях низких яр-

костей поля зрения. Темновая адаптация происходит при понижении яркостей в поле зрения, т.е. при переходе от условий дневного зрения к условиям ночного зрения.

Световая адаптация – приспособление глаза к работе в условиях высокой яркости поля зрения. Световая адаптация происходит при повышении яркостей в поле зрения.

Продолжительность темновой адаптации – 1 ... 2 ч, световой – 5 ... 10 мин.

Процесс адаптации сопровождается фотохимическими и нервными процессами, перестройкой рецептивных полей в сетчатке глаза, изменением диаметра зрачка (зрачковый рефлекс).

При яркостях в поле зрения от 150 ... 200 кд/м² адаптация определяется в основном фотохимическими и нервными процессами и перестройкой рецептивных полей, роль зрачкового рефлекса невелика.

При яркостях поля зрения от 150 ... 200 до 1500 кд/м² фотохимические и нервные процессы становятся второстепенными, а зрачковый рефлекс становится основным фактором, определяющим адаптацию.

При яркостях, больших 1500 кд/м², зрачок максимально сужен и глаз быстро утомляется. Под действием света происходит распад молекул зрительного пигмента фоторецепторов.

При световой адаптации скорость распада зрительного пигмента превышает скорость восстановления. В конце адаптационного периода наступает равновесие. В процессе темновой адаптации скорость реакции восстановления превышает скорость реакции распада зрительного пигмента до тех пор, пока концентрация зрительного пигмента не достигает максимума.

Зрительная индукция. Действие побочных световых раздражителей, приводящее к усилению или ослаблению эффекта прямого раздражителя, называется *индукцией*. Усиление светового эффекта прямого раздражителя – явление положительной индукции; ослабление светового

эффекта прямого раздражителя – отрицательная индукция. Примером отрицательного индуктивного действия является снижение функции зрения при неравномерном распределении яркости в поле зрения, а также при наличии в поле зрения ярких источников. Последнее принято называть ослепленностью.

Снижение зрительных функций при повышенной яркости периферии поля зрения по сравнению с яркостью его центральной части принято объяснять возникновением вуалирующей пелены.

Другой пример отрицательного индуктивного действия – явление дискомфорта, классифицируемое как ощущение неудобства или напряженности, возникающее при неудовлетворительном распределении яркости в освещаемом пространстве. При этом, снижение яркостных функций не обязательно, нарушаются только условия комфортности зрения, наиболее проявляющееся со временем: длительное пребывание в условиях, вызывающих ощущение дискомфорта, приводит к отвлечению внимания, уменьшению сосредоточенности, а также может привести к зрительному и общему утомлению.

Зрительная работоспособность. Зрительная работоспособность (ЗР) – способность выполнять зрительную работу и поддерживать высокую степень мобилизации зрительных функций. Зрительная работоспособность определяет возможность органа зрения совершать какую-либо работу за определенный промежуток времени и влияет на производительность труда и качество работы, может оцениваться состоянием различных функций: критической частотой слияния мельканий, остротой зрения, быстротой различения, видимостью, временным порогом адиспиропии и т.д.

Для оценки ЗР η используется произведение быстроты различения $1/t$ на вероятность p правильного опознания формы объекта наблюдения кольца Ландольта (по Вестону)

$$\eta = 1/t,$$

где t – время различения объекта наблюдения, с.

Явление адиспарии – невосприятие неравенства двух контрастных соприкасающихся полей. Исследование адиспарии проводится с использованием как ахроматического, так и хроматического теста.

Тест представляет собой круг с угловым размером $1 \dots 1,5^\circ$, состоящий из двух цветных или серых контрастных полей, расположенных на белом фоне. После предварительной адаптации к установленной яркости фона наблюдатель фиксирует точку в центре круга на разделе двух полей. Временный порог адиспарии определяется временем от момента фиксации наблюдателем тест-объекта до момента нарушения четкой границы между контрастирующими полями при $K \geq 0,5$ или до исчезновения различия в контрастах сравниваемых полей с контрастом $K \leq 0,2$. Временной порог адиспарии измеряется в секундах и характеризует функциональную устойчивость зрения.

Интенсивная и длительная работа или воздействие неблагоприятных факторов условий труда приводит к временному снижению ЗР, т.е. к зрительному утомлению.

2.3. ГЛАЗНЫЕ ЗАБОЛЕВАНИЯ, ИХ ПРИЧИНЫ И ПРОФИЛАКТИКА УХУДШЕНИЯ ЗРЕНИЯ

Бленнорея – инфекционное заболевание слизистой оболочки (конъюнктивы) глаза, характеризующееся обильным гнойным выделением желтого цвета. Загрязнение происходит обычно через грязные руки.

Блефарит – воспаление края век. Его возникновению способствуют неполноценное питание, малокровие, заболевание зубов, постоянное загрязнение глаза пылью, ветром.

Конъюнктивит – воспаление слизистой оболочки век и глазного яблока. Возникновению этого заболевания способствуют такие факторы окружающей среды как: болезнетворные микробы и вирусы, загрязненный воздух, пыль, задымление, плохо проветриваемое помещение, напряженная зрительная работа при плохом освещении.

Различают острый и хронический конъюнктивит.

Кератит – воспаление роговицы глаза. Чаще вызывается вирусом (гепатическим), реже другими микроорганизмами. Может возникнуть после травмы роговицы (царапина нанесенная ногтем, веткой и т.п.), при некоторых заболеваниях (гриппе, туберкулезе и т.п.), при недостаточности витамина А.

У больного появляется светобоязнь, слезотечение, боли, ощущение инородного тела в глазу.

Катаракта – помутнение хрусталика глаза. Бывает врожденная и приобретенная, например, старческая. Возникновению катаракты способствуют: сахарный диабет, высокая близорукость, травмы глаза и т.п.

Глаукома – хроническое заболевание глаз, основным признаком которого является повышение внутриглазного давления. Возникает чаще всего из-за сосудистых и сосудисто-нервных расстройств. Повышенное давление может привести к гибели нервных элементов в сетчатой оболочке глаза и в результате – к прогрессирующему ухудшению зрения и даже к слепоте.

Бельмо – стойкое помутнение роговой оболочки глаза, представляющее собой рубцовую ткань, развивающуюся чаще всего в результате различных воспалительных заболеваний роговицы (см. кератит). Если бельмо находится в центре роговицы напротив зрачка, зрение снижается резко, если же оно располагается на периферии – в меньшей степени.

Витаминная недостаточность ("куринная слепота") – болезненное состояние при котором отмечается снижение зрения и расстройство способности видеть при

ослабленном (сумеречном, ночном) освещении. Основная причина — нехватка в организме витаминов А и В, входящих в состав зрительного пурпура палочек сетчатки глаза.

Может возникнуть при физических и умственных нагрузках, нервно-эмоциональном напряжении, при кислородном голодании.

Иридоциклит — воспаление переднего отдела сосудистой оболочки глаза. В развитии этого заболевания основная роль принадлежит инфекционным заболеваниям (гриппу, ревматизму, туберкулезу, заболеваниям зубов, придаточных пазух носа и миндалин).

Трахома — инфекционное хроническое заболевание конъюнктивы и роговицы. Начинается незаметно и развивается медленно, постепенно приводит к деформации края век, их завороту или вывороту, неправильному росту ресниц, травмирующих глазное яблоко, к воспалению и помутнению роговицы, вследствие чего острота зрения резко снижается.

Болезнь обычно возникает при низкой гигиенической грамотности, нарушении санитарных норм.

Ячмень — острое гнойное воспаление слезной железы века. Чаще всего ячмень развивается вследствие нарушения гигиенических правил — вытирания глаза грязным полотенцем, платком или руками.

Повреждения глаз. Чаще всего повреждения глаз могут возникнуть на производстве. Основными мерами по предупреждению являются строгое выполнение правил техники безопасности: эффективная вентиляция помещений, уменьшающая запыленность и вероятность попадания в глаза инородных тел; правильное обращение с инструментами, соблюдение порядка и чистоты на рабочем месте.

Техника выполнения лечебных процедур при заболеваниях и повреждениях глаза. Поскольку при заболеваниях и повреждениях глаз некоторые процедуры могут выполняться до обращения к врачу, а очень часто многие назначения врача

выполняют сами больные или их друзья и родственники, необходимо знать технику проведения основных лечебных процедур.

Для промывания глаза комков ваты смачивают свежekiпяченой и остуженной водой, настоем чая, трав или каким-либо рекомендованным врачом дезинфицирующим раствором. Раздвинув веки указательным и большим пальцами левой руки, глаз промывают, выжимая над ним комок увлажненной ваты.

Для промывания также можно применять глазную стеклянную ванночку. Ее наполовину наполняют лекарством, затем больной наклоняет голову и плотно прижимает края ванночки к глазу. После этого он запрокидывает голову вместе с ванночкой назад и разжимает веки: глаз "купается" в жидкости, которой наполнена ванночка.

Большинство медицинских средств при лечении глаза применяется в виде капель. Перед тем как ввести капли больному в глаз моют руки. Пальцами правой руки заполняют пипетку и указательным пальцем левой руки слегка оттягивают нижнее веко. Больной при этом смотрит вверх, слегка запрокинув голову. Нажимая на пипетку, не касаясь ресниц и век больного концом пипетки, закапывают 1 или 2 капли лекарства на конъюнктиву оттянутого века. Не следует сливать из пипетки во флаконы остаток лекарства.

Сразу после закапывания капель в глаз прижимают пальцем внутренний край нижнего века около носа и держат его в этом положении примерно минуту для того, чтобы лекарство сразу не ушло из глаза через слезные пути в нос и носоглотку. Для каждого вида капель следует использовать определенную пипетку.

Примочки для глаз делают следующим образом: чистую вату, смоченную водой или раствором лекарства, прикладывают к закрытым векам, меняя ее через каждые 5 ... 10 мин. Общее время процедуры 30 ... 60 мин.

Профилактика витаминной недостаточности при напряженной зрительной работе. К глазам и мозгу долж-

но поступать достаточное количество витаминов. Большое значение приобретает витаминизация пищи дефектоскопистов, занятых напряженной зрительной работой. В домашних условиях предупреждению витаминной недостаточности прежде всего способствует разнообразная пища, обеспечивающая поступление в организм необходимых витаминов.

Ранними клиническими проявлениями недостатка витамина А (ританола) могут быть – замедленное приспособление к темноте, куриная слепота, светобоязнь. Кроме того наблюдается воспаление слизистой оболочки век. Показания к применению витамина А – ряд заболеваний глаз (пигментный ретинит, блефарит, конъюнктивиты, другие поражения роговицы).

Провитамином А (каротином) наиболее богаты зеленые листья растений: 25 ... 50 г шпината, красного перца или зелени петрушки могут удовлетворить суточную потребность взрослого человека. Для этих же целей достаточно 50 г плодов абрикоса, листьев укропа, моркови, листьев шавеля.

Витамина А особенно много в печени животных и рыб.

Водорастворимые витамины группы В имеют большое значение для питания нервных тканей глаза.

Витамин В₁ (тиамин) питает нервные ткани глаз. При его недостатке возникает головокружение и быстрая утомляемость.

В наибольших количествах этот витамин содержится в дрожжах, в хлебном квасе. Богаты этим витамином соя, гречневая и ячневая крупа, кукуруза. Из продуктов животного происхождения больше всего тиамина в печени и нежирной свинине, почках, сердце.

Витамин В₂ (рибофлавин) оказывает регулирующее влияние на состояние центральной нервной системы, воздействует на процессы обмена в роговице, хрусталике и сетчатке глаза, обеспечивает световое и цветовое зрение. При его недостатке могут развиваться конъюнктивит, блефарит и кератит.

Основными источниками витамина В₂ являются яйца, сыр, молоко, мясо, зерновые и бобовые культуры: чечевица, зеленый горошек, соя и т.п., а также груши, персики, томаты, морковь, свекла, цветная капуста, шпинат.

Аскорбиновая кислота (витамин С) играет важную роль в обменных процессах, особенно в усвоении белков, в восстановлении тканей. Ранними клиническими проявлениями недостатка этого витамина могут быть: общая слабость, вялость, быстрая утомляемость. Плохое зрение в старости может быть обусловлено недостатком витамина С.

В организме человека аскорбиновая кислота не образуется и отсутствуют ее накопления.

Этот витамин содержится в капусте, картофеле, зеленом луке, томатах; его много в зеленом сладком перце, красном перце, черной смородине, хрене, землянике, шавеле, лимонах и многих других продуктах растительного происхождения.

Профилактика ухудшения зрения.

В популярной медицинской литературе можно найти множество рекомендаций относительно профилактики глазных болезней и улучшения зрения [14, 15]. Ниже коротко рассмотрены только некоторые, на наш взгляд, наиболее важные из них.

Условия освещения. Наиболее важным из всех условий хорошего зрения является достаточное освещение, – то, о чем люди с нормально функционирующим зрительным аппаратом могут позволить себе не слишком заботиться, и то, что может совершенно губительно сказаться на тех, чье зрительное функционирование нарушено. Яркость фона не должна быть чрезмерно высокой, контраст деталей с фоном, напротив, должен быть максимальным; близкие источники света, по возможности, должны быть исключены.

Условия зрения вблизи. Системы, обеспечивающие зрение вблизи (аккомодации и конвергенции) не должны быть ни максимально напряжены, ни максимально расслаблены. Зона комфорта (т.е.

оптимальное расположение объектов трудового процесса) – на расстоянии 30 ... 100 см (лучше 40 ... 60 см) от глаза.

Создание условий для перевода взгляда на дальнейшее расстояние является одним из самых эффективных способов релаксации глаз во время их длительной работы с близко расположенными объектами контроля.

Эффективна также пассивная релаксация (пальминг). Техника его выполнения достаточно проста: закрытые глаза прикрыты ладонями рук. Чтобы избежать малейшего давления на глазное яблоко (его никогда не следует давить, тереть, массировать и вообще трогать руками), нижняя часть ладоней должна лежать на скуле, а пальцы на лбу.

Моргание и дыхание. Моргание – это естественный способ смазки и очищения поверхности глаз. Моргание защищает глаза от неприятных ощущений и сохраняет ясность зрения. Правильное моргание (каждые 3 ... 5 секунд) поможет сохранить зрение и повысить эффективность зрительной работы.

Те, кто моргает мало и слишком напряженно (а таких большинство среди страдающих нарушенным зрением), должны сознательно приобрести – или восстановить привычку частого и легкого моргания.

Чем пристальнее мы вглядываемся, тем менее глубоко дышим. В своих напряженных усилиях видеть люди с нарушенным зрением склонны доводить это ненормальное вмешательство в дыхание до крайности. Качество крови (т.е. уровень кислорода, содержащегося в ней), поступающей в органы зрения, может быть повышено глубоким и регулярным дыханием.

Условия резкого изображения. Не пытайтесь видеть больше, чем малую часть общего зрительного поля. Объяснение этому следует искать в физиологии глаза, который наиболее четкие образы фокусирует в центральной части сетчатки, в так называемом желтом пятне, с точкой

острейшей ясности – центральной ямкой. Здесь, однако, имеется важное исключение. Ночью, когда освещение минимально, мы видим лучше и яснее всего ощущаем объект боковыми частями сетчатки. Днем все происходит наоборот: лучше и четче видится только та часть зрительного поля, которая попадает на желтое пятно и в центральную ямку; элементы же изображения, воспринимаемые периферией сетчатки, смутны в очертаниях и менее точны по цвету.

Если рассматривать какое-либо изображение с расстояния около 350 мм, можно видеть его часть размером примерно 200 мм. Но площадь, различимая с превосходной четкостью, будет ограничена кругом диаметром всего около 12 мм, при этом максимальная степень четкости придется на круг диаметром менее 4 мм.

Для того, чтобы ощутить каждую часть объекта контроля центральной фиксацией, т.е. с максимальной четкостью, глаза должны совершить бесчисленное множество мгновенных перемещений с точки на точку (около 120 за 1 мин).

Если подобное по какой-то причине не удастся, мы лишаемся возможности видеть объект и все его части с максимальной четкостью.

Сохранение длительной зрительной работоспособности. Действительным средством длительного сохранения работоспособности в течение рабочего дня является четкий ритм труда. Работа, выполняемая ритмично, примерно на 20 % менее утомительна, чем неритмичная работа той же тяжести. Важное средство борьбы с переутомлением – рациональная смена труда и отдыха или организация в строго определенное время рабочего дня кратковременных перерывов, во время которых производится производственная гимнастика. Она должна состоять из общеукрепляющих и специальных упражнений для глаз. В основу последних должны быть положены принципы тренировки и релаксации аккомодации, а также манипуляции, улучшающие кровообращение глаза.

Предупреждению утомления способствуют устранение излишней зрительной работы, рациональная организация рабочего места, правильная рабочая поза, тренировка.

2.4. МЕДИЦИНСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЕРСОНАЛУ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩЕМУ ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

В соответствии с требованиями "Правил аттестации специалистов неразрушающего контроля", утвержденных Постановлением Госгортехнадзора России и Руководящего документа РД 03-606-2003 (Инструкция по визуальному и измерительному контролю), согласованного Госгортехнадзором России и Госатомнадзором России, специалисты, непосредственно осуществляющие визуальный и измерительный контроль, не должны иметь медицинских противопоказаний по состоянию здоровья.

Приказом Министра здравоохранения и медицинской промышленности РФ № 90 от 14.03.96 утвержден Временный Перечень производственных факторов, при работе с которыми обязательны предварительные (при поступлении на работу) и периодические медицинские осмотры работников, а также врачей-специалистов, участвующих в проведении этих осмотров и необходимых лабораторных и функциональных исследований (Приложение № 1) и Перечень общих медицинских противопоказаний (Приложение № 4).

Поскольку работа дефектоскописта-оператора связана со зрительно-напряженной работой и наблюдением за экраном ЭЛТ, в соответствии с п. 6.2.1 Приложения № 1 упомянутого выше приказа, он должен один раз в год проходить осмотр в лечебно-профилактическом учреждении с участием офтальмолога с целью определения остроты зрения, скиоскопии, рефрактометрии, объема аккомодации,

исследование форий тонометрии и цветоощущения.

Ниже перечислены медицинские противопоказания для выполнения зрительно-напряженных работ: прецизионных работ с объектом различения до 0,3 мм; прецизионных работ с оптическими приборами и наблюдение за экраном ЭЛТ.

1. Острота зрения с коррекцией при предварительном профосмотре ниже 1,0, при повторных периодических медосмотрах ниже 0,8 на одном глазу и 0,5 на другом глазу.

2. Аномалии рефракции: при предварительном осмотре – миопия выше 2,0D, гиперметропия выше 2,0D, астигматизм выше 1,0D; при повторных медосмотрах: миопия выше 8,0D, гиперметропия выше 6,0D, астигматизм выше 3,0D.

3. Отсутствие бинокулярного зрения.

4. Снижение аккомодации ниже возрастных норм.

5. Лагофталм (несмыкание век).

6. Хронические заболевания переднего отрезка глаз (век, конъюнктивы, роговицы, слезовыводящих путей).

7. Заболевание зрительного нерва, сетчатки.

8. Глаукома.

Перечень общих медицинских противопоказаний к допуску в контакт с вредными, опасными веществами и производственными факторами, а также на работы в соответствии с Приложением № 1 (Приложение № 4).

1. Врожденные аномалии органов с выраженной недостаточностью их функций.

2. Органические заболевания центральной нервной системы со стойкими выраженными нарушениями функций.

3. Хронические психические заболевания и приравненные к ним состояния, подлежащие обязательному диспансерному динамическому наблюдению в психоневрологических диспансерах, эпилепсия с пароксимальными расстройствами.

В случаях выраженных форм пограничных психических заболеваний вопрос о пригодности к соответствующим работам решается комиссией психоневрологического учреждения индивидуально.

4. Наркомании, токсикомании, хронический алкоголизм.

5. Болезни эндокринной системы с выраженными нарушениями функций.

6. Злокачественные новообразования (после проведенного лечения вопрос может решаться при отсутствии абсолютных противопоказаний).

7. Все злокачественные заболевания системы крови.

8. Гипертоническая болезнь III стадии.

9. Болезни сердца с недостаточностью кровообращения.

10. Хронические болезни легких с выраженной легочно-сердечной недостаточностью.

11. Бронхиальная астма тяжелого течения с выраженными функциональными нарушениями дыхания и кровообращения.

12. Активные формы туберкулеза любой локализации.

13. Язвенная болезнь желудка, 12-перстной кишки с хроническим рецидивирующим течением и склонностью к кровотечениям.

14. Циррозы печени и активные хронические гепатиты.

15. Хронические болезни почек с явлениями почечной недостаточности.

16. Болезни соединительной ткани.

17. Болезни нервно-мышечной системы и опорно-двигательного аппарата со стойкими нарушениями функций, мешающие выполнению обязанностей по профессии.

18. Беременность и период лактации.

19. Привычное невынашивание и аномалии плода в анамнезе у женщин планирующих деторождение.

20. Нарушение менструальной функции, сопровождающееся маточными кровотечениями (кроме работ, не связанных с напряжением зрения).

21. Глаукома декомпенсированная.

По европейским нормам EN 473 дефектоскопист, для допуска к работе, должен прочитать текст № 1 по таблице Егера или равноценный текст с расстояния не менее 30 см каждым глазом с очками или без очков и иметь достаточное цветовое зрение.

Инструкция Американского общества неразрушающего контроля SNT-TC-1A рекомендует ежегодно проводить тестирование дефектоскопистов на ближнее зрение – с коррекцией чтения текста № 2 по таблице Егера с расстояния не менее 30 см, хотя бы одним глазом, и иметь достаточное цветовое зрение.

Военный стандарт США MIL-STD-410 требует, чтобы проверка зрения по тексту № 1 таблицы Егера, проводилась квалифицированным медицинским персоналом.

По международному стандарту ISO 9712 дефектоскопист должен представить документальное подтверждение удовлетворительного зрения в соответствии со следующими требованиями:

а) острота ближнего зрения должна позволять чтение, как минимум, таблицы Егера № 1 или Таймс Роман № 4, 5, или эквивалентных букв на расстоянии 30 см, одним или двумя глазами, скорректированными или некорректированными;

б) цветовое зрение должно быть достаточным для того, чтобы дефектоскопист мог распознать и различить контраст между цветами, используемыми в соответствующем методе неразрушающего контроля по выбору работодателя.

После сертификации проверка остроты зрения должна проводиться ежегодно, что должно контролироваться работодателем или ответственным учреждением.

Глава 3

СВЕТОТЕХНИКА

3.1. МАССОВЫЕ ИСТОЧНИКИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником оптического излучения называют устройство, предназначенное для превращения какого-либо вида энергии в оптическое излучение.

Оптическое излучение отдельных атомов, ионов, молекул, а также жидких и твердых тел возникает в результате переходов их валентных (оптических) электронов из возбужденных состояний, в которое они попадают в результате поглощения энергии извне, в состоянии с меньшей энергией. Частота испускаемых при этом электромагнитных волн ν , как известно, равна:

$$\nu = (W_2 - W_1)/h,$$

где W_2 и W_1 — соответственно энергии начального (до излучения) и конечного состояний; h — постоянная Планка. Спектры излучения атомов и ионов в газе состоят из отдельных спектральных линий, спектры молекул — из густо расположенных линий, переходящих в полосы, а спектры жидкостей и твердых тел носят непрерывный характер.

По физической природе различают два вида оптических излучений: тепловое и люминесценцию.

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

Основные законы теплового излучения установлены для идеализированного тела, называемого черным телом. В качестве него принято тело, которое поглоща-

ет все падающие на него излучения (коэффициент поглощения $\alpha = 1$) независимо от длины волны, направления падения и состояния поляризации.

Закон Стефана-Больцмана определяет соотношение между энергетической светимостью черного тела M_{es} (Вт/м²) и его температурой

$$M_{es} = \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴) — постоянная Стефана-Больцмана.

Закон Вина устанавливает, что произведение длины волны, соответствующей максимуму спектральной плотности энергетической светимости тела, на его абсолютную температуру есть величина постоянная

$$\lambda_{\max} T = b,$$

где $b = 2898 \cdot 10^6$ нм · К — постоянная Вина.

Световая отдача черного тела имеет максимальное значение

$$\eta_{vsmax} = 89,5 \text{ лм/Вт}$$

при

$$T = 6600 \text{ К } \eta_{vsmax} = 683 \eta_{ces},$$

где η_{ces} — световой КПД излучения черного тела.

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, в том числе металлов, описывается законами излучения черного тела с внесением в них экспериментально установленных коэффициентов. Так, для оценки интегрального значения тепловой энергетической светимости металлов $M_e(T)$ применяется выражение, аналогичное закону Стефана-Больцмана:

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

где $\varepsilon(T)$ – интегральный коэффициент теплового излучения металла.

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.

Твердые или жидкие вещества, способные излучать свет под действием различного рода возбуждений, называют *люминофорами*. Спектр люминесценции может состоять из отдельных линий (излучение отдельных атомов и ионов), полос (излучение молекул) и непрерывных участков (излучение твердых тел и жидкостей). При люминесценции возможно более эффективное преобразование подводимой энергии в оптическое излучение, чем при тепловом возбуждении, поскольку люминесценция в принципе не требует нагрева тел.

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 возбуждения); *фотолюминесценция* (оптическое излучение, возникающее в результате поглощения телами оптического излучения).

Излучение характеризуется потоком (световым) Φ_e (Φ_v), силой излучения I_e (силой света I_v), энергетической (световой) яркостью L_e (L_v), ее распределением по поверхности светящегося тела и направлениям, спектральной плотностью вышеперечисленных величин (спектром излучения). Цвет излучения ламп дополнительно характеризуется цветовыми параметрами.

Электрический режим характеризуется: мощностью лампы $P_{\text{л}}$, рабочим напряжением на лампе $U_{\text{л}}$, напряжением

питания U_c , током I и родом тока (постоянный, переменный с частотой f и т.д.).

К основным геометрическим параметрам ламп относятся: габаритные и присоединительные размеры, высота светового центра, размеры излучающего тела. К конструктивным – форма колбы, ее оптические свойства (прозрачная матированная, зеркализованная и т.д.), форма и расположение тела накала, конструкция ножки или вводов, тип цоколя, формы и размеры разрядной колбы, конструкция и размеры электродов, расстояние между ними и др.

При оценке эффективности лампы наиболее важны:

– энергетический КПД в заданной области спектра от λ_1 до λ_2

$$\eta_{\text{эн.л}} = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\text{л}}(\lambda) d\lambda \right) / P_{\text{л}};$$

– эффективный КПД лампы для соответствующего приемника излучения

$$\eta_{\text{эф.л}} = \left(\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e\text{л}}(\lambda) s(\lambda) d\lambda \right) / P_{\text{л}},$$

где $s(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность приемника излучения;

– эффективная отдача лампы

$$\Phi_{\text{эф.л}} / P_{\text{л}} = s_{\text{max}}(\lambda) \eta_{\text{эф.л}},$$

где $\Phi_{\text{эф.л}}$ – эффективный поток излучения, оцениваемый по уровню реакции приемника; это – размерная величина, измеряемая в специальных единицах, выбранных для оценки реакции данного приемника; $s_{\text{max}}(\lambda)$ – значение максимальной спектральной чувствительности приемника (размерная величина).

Если приемник – человеческий глаз, то $\Phi_{\text{эф}}$ – световой поток Φ_v в люменах; $V(\lambda) = s(\lambda)$ относительная спектральная световая эффективность излучения

$$s_{\text{max}} = 680 \text{ лм/Вт при } \lambda = 555 \text{ нм.}$$

Световая отдача лампы, лм/Вт

$$\eta = \Phi / P_{\text{л}} = 680 \left(\int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi_{\text{ел}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right) / P_{\text{л}}$$

Световой КПД соответственно

$$\eta_{\text{св.л}} = \left(\int_{\lambda=380}^{\lambda=780} \Phi_{\text{ел}}(\lambda) V(\lambda) d\lambda \right) / P_{\text{л}}$$

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 или частичной утраты ими работоспособности. Например, в лампах накаливания — из-за перегорания нити, в газоразрядных лампах — из-за потери способности зажигаться и т.п.

Полезным сроком службы называют продолжительность горения ламп от начала эксплуатации или испытания до момента ухода за установленные пределы одного из параметров, определяющих целесообразность использования ламп данного типа.

Например, из-за снижения потока или яркости ниже определенного предела для осветительных и облучательных ламп или невозможности эксплуатации специальных газоразрядных ламп высокой яркости в светооптических приборах из-за нестабильности положения дуги и т.п. Важным показателем надежности является также вероятность безотказной работы ламп в течение заданного времени, которая часто регламентируется минимальной продолжительностью горения.

подавляющее большинство современных источников света относятся к категории электрических. По принципу действия их можно разделить на две большие группы, которые вместе вырабатывают около 98 ... 99 % всего светового потока. 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 современных осветительных 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.

Цветопередача, обеспечиваемая люминесцентными лампами, наиболее благоприятна по сравнению с другими газоразрядными лампами, так как у них энергия излучения равномернее распределена по всему диапазону видимости спектра, а не сосредоточена в нескольких спектральных линиях или полосах, как у большинства других разрядных ламп.

3.2. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ СВЕТА

Светоизлучающие диоды. Светоизлучающие диоды представляют собой микроминиатюрные полупроводниковые источники света, в которых излучение возникает на полупроводниковом переходе в результате рекомбинации электронов и "дырок". В светоизлучающих диодах используются полупроводниковые материалы высокой чистоты, легированные малыми количествами контролируемых примесей, создающих либо избыток электронов (материал *n*-типа), либо их недос-

татов, 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 $10^3 \dots 10^4$ см², 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.

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

- 1) высокой когерентностью в пространстве и во времени;
- 2) исключительно узкой направленностью (расходимость до 0,4°);
- 3) огромной концентрацией мощности до 10^{11} Вт/см² в непрерывном режиме и до 10^{18} Вт/см² в импульсе);
- 4) высокой степенью монохроматичности ($\Delta\lambda = 10^{-9}$ нм при $\lambda = 500$ нм);
- 5) способностью фокусироваться в исключительно малые объемы порядка λ^3 .

Фундаментальный вклад в эту новую бурно развивающуюся область науки и техники, называемую квантовой электроникой, внесли отечественные ученые. Первые лазеры были созданы в 1960 г.

Принцип действия лазеров основан на использовании теоретически предсказанного А. Эйнштейном еще в 1916 г. процесса вынужденного (стимулированного, индуцированного) 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 тождествен с вызвавшим его внешним фотоном по направлению, частоте, фазе и поляризации. На языке волновой оптики это означает, что вынужденное излучение когерентно со стимулирующим. Этот принцип справедлив для всего спектра электромагнитного излучения.

Вынужденное излучение в оптическом диапазоне спектра в обычных условиях значительно меньше спонтанного и поэтому практически не наблюдалось. В 1940 г. был предложен метод прямого доказательства существования вынужденного излучения и при этом впервые обращалось внимание на принципиальную возможность создания среды, не ослабляющей, а усиливающей проходящее через нее излучение. Для этого необходимо создать такие искусственные условия, при которых концентрация возбужденных атомов или молекул на каком-либо верхнем энергетическом уровне была бы больше, чем их концентрация на каком-либо нижнем, соответствующем оптическому переходу между ними. Такая необычная "заселенность" энергетических уровней называется теперь *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 пере-

ходу, проходя через активную среду, вызывает лавину вынужденных фотонов, "летающих" 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 возбуждаться 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 установок 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:

- 1) электрическим разрядом (газовые лазеры);
- 2) оптическим излучением (твердотельные и жидкостные);
- 3) 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. 3.1.

3.1. Некоторые параметры лазеров

Тип лазеров	Длина волны, мкм	Режим работы	Мощность лазерного излучения, Вт	Частота импульсов, Гц	КПД, %
Газовые					
атомные гелий-неоновые	0,63	Н	$10^{-3} \dots 10^{-1}$	—	0,05
Ионно-аргоновые	0,488; 0,515	Н	$0,1 \dots 10^2$	—	0,1
Молекулярные на CO₂					
отпаянные	10,6	Н	$10 \dots 10^2$	—	5 ... 10
продольно-прокачные		Н И	$10^2 \dots 10^4$ $10^6 \dots 10^{9*}$	— 25 ... 100	— 15 ... 20
Твердотельные					
на рубине	0,693	ИСГ	$10^2 \dots 10^6$	0,01 ... 10	1
на неодимовом стекле	1,058	ИСГ	$10^4 \dots 10^6*$	0,01 ... 0,003	5 ... 6
на ИАГ Nd ³⁺	1,06	Н	$10 \dots 10^3$	—	2 ... 3
	1,06	ИСГ	$10^5 \dots 10^7*$	10 ... 10^2	1,5 ... 2

Окончание табл. 3.1

Тип лазеров	Длина волны, мкм	Режим работы	Мощность лазерного излучения, Вт	Частота импульсов, Гц	КПД, %
Полупроводниковые на арсениде галлия	0,84	И	2 ... 70*	(0,5 ... 5)10 ³	До 50
Жидкостные на красителях	0,34 ... 0,89	И	—	0,03 ... 25	До 50

* Импульсная мощность

Условные обозначения: Н – непрерывный; И – импульсный; ИСГ – импульсный режим свободной генерации.

3.3. СВЕТОВЫЕ ПРИБОРЫ

Световым прибором называют устройство, содержащее источник света (лампу) и светотехническую аппаратуру и предназначенное для освещения или световой сигнализации. (Светотехническая аппаратура осветительных приборов называется обычно осветительной арматурой). Светотехническая арматура перераспределяет свет источника света в пространстве или преобразует его свойства (изменяет спектральный состав излучения или поляризует его). Наряду с этим световой прибор выполняет функции защиты источника света от воздействия окружающей среды, механических повреждений, обеспечивает крепление источника света и подключение к источнику питания.

Классификация световых приборов осуществляется по главным и дополнительным признакам. К главным признакам относятся: основная светотехническая функция, характер светораспределения, условия эксплуатации и основное назначение.

По основной светотехнической функции световые приборы разделены на приборы для пространств и для экстремальных сред.

Светильник – это световой прибор, перераспределяющий свет лампы (ламп) внутри больших телесных углов (до 4 π) и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока с коэффициентом уси-

ления не более 30 для круглосимметричных и не более 15 – для симметричных приборов. Светильники предназначены, как правило, для освещения относительно близко расположенных объектов (находящихся на расстояниях, обычно меньше чем 20-кратные максимальные размеры светильников) или для сигнализации на небольших расстояниях.

Пржектор – световой прибор, перераспределяющий свет лампы внутри малых телесных углов и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока с коэффициентом усиления более 30 для круглосимметричных и более 15 для симметричных приборов.

Проектор – световой прибор, перераспределяющий свет лампы с концентрацией светового потока на поверхности малого размера или в малом объеме.

К дополнительным признакам классификации световых приборов в частности относятся:

– возможность перемещения при эксплуатации (стационарные, переносные и передвижные);

– способ установки световых приборов (рис. 3.1).

Светильниками общего освещения называются светильники, предназначенные для общего освещения помещения и открытых пространств; *светильниками местного освещения* – светильники, рассчитанные в основном на освещение рабочих поверхностей; *светильниками комбинированного освещения* – приборы,

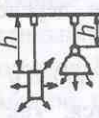


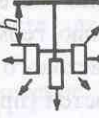







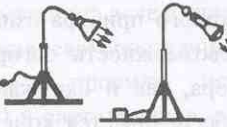
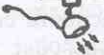




	Подвесные СП	Настенные СП	Потолочные СП	Опорные СП			
			 $h \leq 0,1 \text{ м}$	Настольные	Напольные	Венчающие	Консольные
Стационарные СП	 $h > 0,1 \text{ м}$	Встраиваемые СП 	Пристраиваемые СП 				
	Переносные СП	Ручные СП	Головные СП	На стойке		На магнитном основании	
Сетевые		—					
Автономные							

Рис. 3.1. Классификация световых приборов (СП) по способу установки

создающие (поочередно или одновременно) как общее, так и местное освещение.

Стационарный световой прибор — прибор, закрепленный на месте установки, для снятия которого требуется применение инструмента. Нестационарный световой прибор может быть снят с места установки без применения инструмента и перемещен в другое место. Переносной световой прибор — нестационарный прибор с индивидуальным источником питания или отключаемый при перемещениях.

3.4. ХАРАКТЕРИСТИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Электрическая безопасность определяется классом защиты от поражения электрическим током (или видом приборов по электрической изоляции), степени защиты от соприкосновения с токоведущими частями, напряжением, сопротивлением и электрической прочностью электрической изоляции, путями утечки и воздушными зазорами.

Существует пять классов защиты световых приборов от поражения электрическим током [6].

Под малым напряжением понимается номинальное напряжение светового прибора, не превышающее 42 В между проводниками и землей (при напряжении холостого хода до 50 В). Безопасным считается также напряжение до 110 В постоянного тока.

Электрическая безопасность световых приборов характеризуется также сопротивлением изоляции между различными частями, к которым приложено напряжение, как при нахождении световых приборов в нормальных условиях окружающей среды, так и после определенного периода нахождения в условиях повышенной влажности, причем длительность этого периода зависит от основного назначения светового прибора. Электрическая прочность изоляции определяется значениями испытательного напряжения частотой 50 Гц, которое должно выдерживаться без пробоя и перекрытия токоведущих частей.

Взрывозащищенность. В зависимости от области применения взрывозащищенные световые приборы условно разделяются на следующие группы:

группа I – рудничные взрывозащищенные световые приборы для подземных выработок шахт и рудников, опасных по газу и пыли;

группа II – взрывозащищенные световые приборы для внутренней и наружной установки на предприятиях химической, нефтяной, газовой и других отраслей промышленности, где возможно образование взрывоопасных смесей.

Пожарная безопасность. Пожарная безопасность светового прибора означает практическую невозможность загорания как самого прибора, так и окружающей его среды, что обеспечивается конструкцией светового прибора, выбором комплектующих изделий и материалов с температурными характеристиками, соответствующими тепловому режиму работы светового прибора. При этом характеристикой пожаробезопасности является соответствие температуры на основных элементах светового прибора допустимым значениям как в рабочем, так и в аварийном режиме работы.

Для потолочных, встраиваемых и опорных световых приборов существенными с точки зрения пожарной опасности являются параметры возгораемости материалов, из которых изготовлены опорные поверхности. Эти материалы условно могут быть подразделены на три группы: нормально возгораемые (горючие) материалы, температура воспламенения которых менее 200 °С и которые не деформируются до этой температуры (например, дерево, толщиной свыше 2 мм); негорючие материалы, т.е. те, которые неспособны поддерживать горение (например, металл, бетон, штукатурка); легко возгорае-

мые материалы, которые не могут быть классифицированы как нормально возгораемые (например, фанера или другие материалы, содержащие дерево, толщиной менее 2 мм).

Защита от пыли, воды и агрессивных сред обеспечивается, как правило, выбором соответствующих конструктивных и светотехнических материалов, а также различной степенью герметизации внутреннего объема светового прибора или отдельных его полостей (прежде всего полости расположения электрических контактов).

3.5. НОРМИРОВАНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ

Требования к освещению регламентируются СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение", которые введены в действие с 1 января 1996 г. в качестве государственного стандарта Российской Федерации Постановлением Минстроя России от 02.08.95 № 18-78, на основе которых разрабатываются отраслевые нормы освещения, учитывающие специфические особенности технологического процесса и строительных решений зданий и сооружений отрасли, которые согласовываются и утверждаются в установленном порядке. СНиП содержит семь разделов и семь приложений:

1. Область применения.
2. Нормативные ссылки.
3. Определения.
4. Общие положения.
5. Естественное освещение.
6. Совмещенное освещение.
7. Искусственное освещение.

Приложение А. Термины и определения.

Приложение Б. Определение разряда работ при расстоянии от объекта различения до глаз работающего более 0,5 м.

Приложение В. Определение эквивалентного размера протяженных объектов различения.

Приложение Г. Эксплуатационные группы светильников.

Приложение Д. Группы административных районов по ресурсам светового климата.

Приложение Е. Рекомендуемые источники света для производственных помещений.

Приложение Ж. Рекомендуемые источники света для общего освещения жилых и общественных зданий.

Приложение А содержит следующие термины и определения:

1. *Боковое естественное освещение* – естественное освещение помещения через световые проемы в наружных стенах.

2. *Верхнее естественное освещение* – естественное освещение помещения через фонари, световые проемы в стенах в местах перепада высот здания.

3. *Естественное освещение* – освещение помещений светом неба (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.

6. *Контраст объекта различения с фоном K* определяется отношением абсолютной величины разности между яркостью объекта и фона к яркости фона.

Контраст объекта различения 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).

7. *Коэффициент естественной освещенности (КЕО)* – отношение естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения светом неба (непосредственным или после отражений), к одновременно значению наружной горизонтальной освещенности, создаваемой светом полностью открытого небосвода; выражается в процентах.

8. *Коэффициент запаса K_3* – расчетный коэффициент, учитывающий снижение КЕО и освещенности в процессе эксплуатации вследствие загрязнения и старения светопрозрачных заполнений в световых проемах, источников света (ламп) и светильников, а также снижение отражающих свойств поверхностей помещения.

9. *Коэффициент пульсации освещенности $K_{п}$, %* – критерий оценки относительной глубины колебания освещенности в результате изменения во времени светового потока газоразрядных ламп при питании их переменным током, выражающийся формулой

$$K_{п} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2E_{\text{ср}}} 100,$$

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

10. *Местное освещение* – освещение, дополнительное к общему, создаваемое светильниками, концентрирующими световой поток непосредственно на рабочих местах.

11. *Объект различения* – рассматриваемый предмет, отдельная его часть или

дефект, которые требуется различать в процессе работы.

12. *Общее освещение* – освещение, при котором светильники размещаются в верхней зоне помещения равномерно (общее равномерное освещение) или применительно к расположению оборудования (общее локализованное освещение).

13. *Отраженная блескость* – характеристика отражения светового потока от рабочей поверхности в направлении глаз работающего, определяющая снижение видимости вследствие чрезмерного увеличения яркости рабочей поверхности и вуалирующего действия, снижающего контраст между объектом и фоном.

14. *Показатель дискомфорта M* – критерий оценки дискомфортной блескости, вызывающей неприятные ощущения при неравномерном распределении яркостей в поле зрения, выражающийся формулой

$$M = \frac{L\omega^{0,5}}{\Phi_0 L_{ад}^{0,5}},$$

где L – яркость блеского источника, кд/м²; ω – угловой размер блеского источника, стер; Φ_0 – индекс позиции блеского источника относительно линии зрения; $L_{ад}$ – яркость адаптации, кд/м².

При проектировании показатель дискомфорта рассчитывается инженерным методом.

15. *Показатель ослепленности P* – критерий оценки слепящего действия осветительной установки, определяемый выражением

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

где S – коэффициент ослепленности, равный отношению пороговых разностей ярко-

стей при наличии и отсутствии слепящих источников в поле зрения.

16. *Рабочая поверхность* – поверхность, на которой производится работа, нормируется или измеряется освещенность.

17. *Рабочее освещение* – освещение, обеспечивающее нормируемые осветительные условия (освещенность, качество освещения) в помещениях и в местах производства работ вне зданий.

18. *Совмещенное освещение* – освещение, при котором недостаточное по нормам естественное освещение дополняется искусственным.

19. *Условная рабочая поверхность* – условно принятая горизонтальная поверхность, расположенная на высоте 0,8 м от пола.

20. *Фон* – поверхность, прилегающая непосредственно к объекту различения, на которой он рассматривается.

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.

21. *Эквивалентный размер объекта различения* – размер равнорядного круга на равнорядном фоне, имеющего такой же пороговый контраст, что и объект различения при данной яркости фона.

Общие положения содержат требования к освещению промышленных предприятий (табл. 3.2).

При расстоянии от объекта различения до глаз работающего более 0,5 м ряд работ, по табл. 3.2, 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. 3.3.).

3.2. Требования к освещению промышленных предприятий

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение		
						Освещенность, лк		при системе общего освещения
						при системе комбинированного освещения	в т.ч. от общего	
Наивысшей точности	менее 0,15	I	a	Малый	Темный	5000	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	a	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	a	Малый	Темный	2000	200	500
			б	Малый Средний	Средний Темный	1000 750	200 200	300 200
			в	Малый Большой	Светлый Темный	750 600	200 200	300 200
			г	Средний Средний	Светлый Светлый	400 400	200 200	200 200
Средней точности	св. 0,5 до 1,0	IV	a	Малый	Темный	750	200	300
			б	Малый	Средний	500	200	200
			в	Средний	Средний	400	200	200

Примечание. Наименьшие размеры объекта различения и соответствующие им разряды зрительной работы установлены при расположении объектов различения на расстоянии не более 0,5 м от глаза работающего. При увеличении этого расстояния разряд зрительной работы следует устанавливать в соответствии с табл. 3.3. Для протяженных объектов различения эквивалентный размер выбирается по рис. 3.3.

3.3. 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	Св. $0,6 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-3}$
IV	Св. $1 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-3}$
V	Св. $2 \cdot 10^{-3}$ до $10 \cdot 10^{-3}$
VI и VII	Св. $10 \cdot 10^{-3}$

3.5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНОГО РАЗМЕРА ПРОТЯЖЕННЫХ ОБЪЕКТОВ РАЗЛИЧЕНИЯ

Для протяженных объектов различения, имеющих длину $a > 2b$, где b – ширина объекта, разряд зрительных

работ определяется по эквивалентному размеру объекта. В остальных случаях разряд зрительных работ определяется по минимальному размеру объекта различения.

При расстояниях от глаза до объекта, меньших 500 мм, эквивалентный размер определяется по номограмме, приведенной на рис. 3.2.

При расстояниях от глаза до объекта, больших 500 мм, эквивалентный размер определяется по номограмме, приведенной на рис. 3.3.

Преобразование линейных размеров объекта различения (в миллиметрах) в угловые (в угловых минутах) при использовании номограммы, приведенной на рис. 3.3, осуществляется по формуле

$$\alpha = 60 \arctg(x/l),$$

где x – размер объекта, мм; l – расстояние от глаз до объекта, мм.

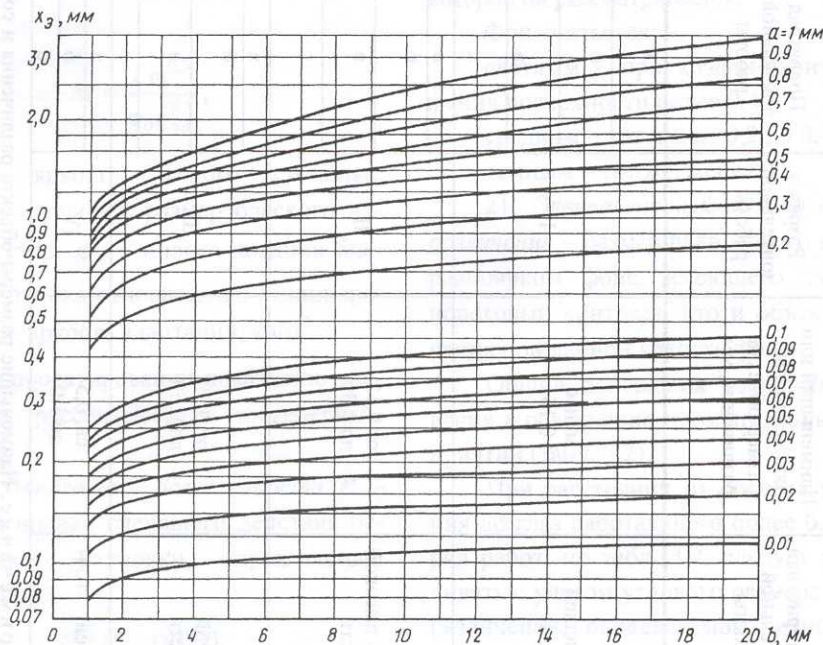


Рис. 3.2. Номограмма для определения эквивалентного размера протяженных объектов различения при расстояниях от глаза до объекта до 500 мм

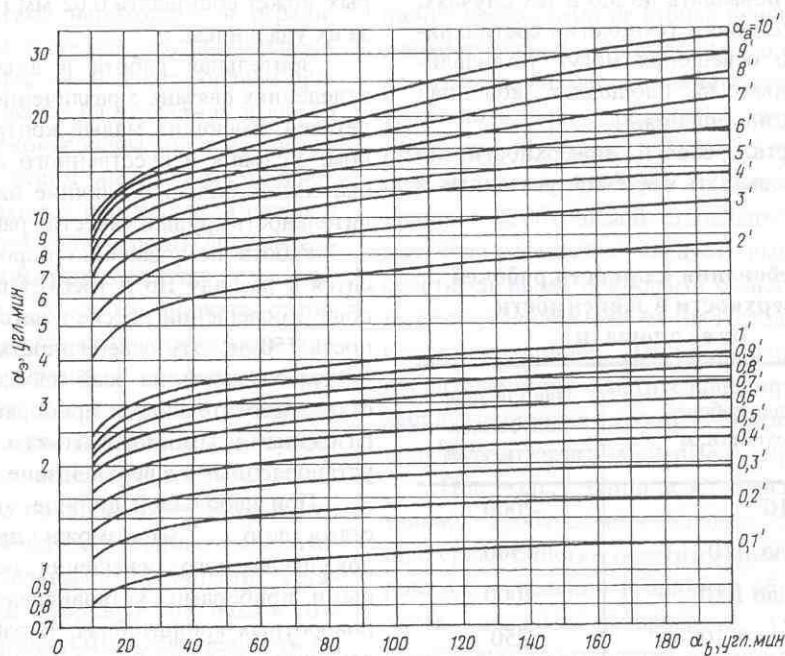


Рис. 3.3. Номограмма для определения эквивалентного размера протяженных объектов различения при расстояниях от глаза до объекта более 500 мм

Преобразование полученного по номограмме эквивалентного размера из угловых размеров (угловых минут) в линейные (миллиметры) осуществляются по формуле

$$x = htg(\alpha / 60).$$

3.5.2. ОСВЕЩЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

Нормы освещенности, приведенные в табл. 3.3, 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 различения на поверхности размером 0,1 м² и более;

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

Отношение максимальной освещенности 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. 3.4.

3.4. Требования к яркости рабочей поверхности в зависимости от ее площади

Площадь рабочей поверхности, м ²	Наибольшая допустимая яркость, кд/м ²
Менее 1·10 ⁻⁴	2000
От 1·10 ⁻⁴ до 1·10 ⁻³	1500
Св. 1·10 ⁻³ до 1·10 ⁻²	1000
Св. 1·10 ⁻² до 1·10 ⁻¹	750
Более 1·10 ⁻¹	500

3.6. ОСВЕЩЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

В черной металлургии. Работы, связанные с большим зрительным напряжением, ведутся в адьюстажных отделениях прокатных цехов, где проводится комплекс операций по браковке, сортировке, удалению пороков, клеймению прокатных заготовок и готовой продукции. Адьюстажные отделения занимают значительные площади, достигающие нескольких тысяч квадратных метров при ширине зоны работы от 3 м до всей ширины пролета (36 м).

В адьюстажных отделениях цехов горячего проката проводится осмотр слитков или заготовок или удаление пороков огневой зачисткой, пневматическими зубилами или передвижными наждачными станками. Наиболее напряженными операциями являются обнаружение поро-

ков (трещин, зарезов и т.п.), ширина которых может составлять 0,02 мм и контроль за их удалением.

Зрительная работа в адьюстажных отделениях связана с различием мелких деталей, имеющих малый контраст с фоном. Условия искусственного освещения оказывают большое влияние на производительность труда и качество работы.

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

При небольшой ширине зоны адьюстажа (до 6 ... 7 м) возможно применение локализованного освещения осветительными приборами, устанавливаемыми на поворотных кронштейнах. В рабочем положении кронштейн перпендикулярен продольной оси пролета, а при транспортировке заготовок краном поворачивается в положение, параллельное оси пролета.

Для доведения уровня освещенности до требуемого разрядом Ia значения 4000 лк при комбинированном освещении люминесцентными лампами при работе контролеров пользуются ручными переносными осветительными приборами, питаемыми напряжением 36 В от электрических соединителей.

В адьюстажных отделениях отделки сортового проката выявляются такие же пороки, как на заготовках, и ведутся работы по удалению пороков. При этом преобладают работы по контролю, для которых освещенность нормируется по разряду Ia. В связи с трудностью устройства местного стационарного освещения и применения ручных переносных осветительных приборов рекомендуется устраивать общее освещение с освещенностью 1500 лк. Способы освещения адьюстажа холодного проката рекомендуются те же, что и для адьюстажа заготовок.

В адьюстажных отделениях листо-прокатных цехов необходимо в ограниченное время выявлять трудно различимые пороки листов. В цехах горячей прокатки листы лежат на стеллажах высотой 0,1 ... 0,2 м и контролеры ходят по листам и отмечают мелом выявленные пороки, 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 Ib. 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, что создает благоприятное направление света, исключающее отраженную блескость. Для отдельных рабочих мест возможна установка осветительных приборов локализованного освещения также на поворотных кронштейнах.

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 литейных цехах. Местное освещение необходимо на столах ручной формовки стержней и их визуального контроля, а также на местах технического контроля литья при определении качества и геометрии отливок. Из-за отсутствия осветительных приборов местного освещения с необходимой степенью защиты местное освещение следует выполнять осветительными приборами общего освещения, устанавливая их над столами на стене или колоннах. Для уменьшения слепящего действия осветительных приборов эксплуатационная служба предприятия должна изготовить защитные козырьки.

При эксплуатации осветительных установок необходимо соблюдать следующие сроки очистки осветительных приборов: для отделений вторичной обработки литья, цеховых лабораторий, участков подготовки производства и ремонта оснастки, цеховых складов моделей и вспомогательных материалов – не реже 1 раза в 3 месяца.

В гальванических цехах. Зрительные работы на участке покрытия сводятся к проверке качества подготовки поверхности деталей, визуальную проверку операций при загрузке деталей в ванны, контролю показаний электроизмерительных приборов и проверке качества покрытий на выходе из ванны.

В отделениях шлифовки и полировки визуальный контроль качества обработки покрытия осложняется наличием блестящих поверхностей, что может приводить к ослепленности работающих из-за высокой отраженной блескости. Требования к цветоразличению, как правило, отсутствуют, за исключением случаев, когда необходимо различать детали с двумя близкими "на глаз" видами покрытия (например, при комплектации элементов корпуса наручных часов и наличии двух видов золочения).

В большинстве гальванических цехов общепромышленных производств объекты различения (элементы обрабатываемой детали или дефекты в покрытии) имеют размер от 0,15 до 1 мм, их фотометрический контраст с фоном – малый или средний.

В цехах окраски. К качеству большинства изделий предъявляются требования соответствия их цвета цвету эталона или утвержденного образца. Окрашенные поверхности должны быть ровными, гладкими, глянцевыми или матовыми, однотонными или с четкими надписями и другими изображениями.

Качество лакокрасочных покрытий, нанесенных на поверхность изделий, по их внешнему виду регламентируется нормативной документацией, согласно которой окрашиваемые поверхности в зависи-

мости от дефектов и изъянов, таких как наличие посторонних частиц в лакокрасочном покрытии (включения), шагрень (рябь на поверхности покрытия), потеки, риски, штрихи, волнистость, разнооттеночность и неоднородность рисунка, часто подразделяются на семь классов. При покрытиях I класса допускаются только некоторые едва различимые дефекты, при покрытиях II–VI классов размеры дефектов допустимы в определенных пределах, при покрытиях VII класса показатели внешнего вида покрытий не нормируются (табл. 3.5).

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

3.5. Рекомендуемое соотношение классов лакокрасочных покрытий и разрядов зрительной работы

Класс покрытия	Размер допустимых включений на поверхности, мм	Характеристика зрительных работ	
		Точность	Наименьший размер объекта различения, 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 ... 1,5	Малая	1 ... 5
VII	–	Очень малая	–

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Оптической системой называют совокупность оптических деталей (линз, призм, зеркал и т.п.), предназначенную для определенного формирования пучков световых лучей.

По положению предмета и его изображения относительно оптической системы последние подразделяются на следующие виды:

1) микроскоп (предмет – на конечном расстоянии, а изображение – в бесконечности);

2) телескопическая система (предмет и его изображение – в бесконечности);

3) объектив (предмет – в бесконечности, а изображение на конечном расстоянии);

4) проекционная система (предмет и его изображение – на конечном расстоянии).

4.1. ЗЕРКАЛА, ЛИНЗЫ И ОЧКИ

Одним из наиболее простых способов контроля недоступных (скрытых) поверхностей или поверхностей, наклоненных менее 30° к зрительной оси глаза, является осмотр их с помощью зеркал.

Плоским зеркалом называют оптическую деталь с плоской отражающей поверхностью, предназначенную для изменения направления оси оптической системы.

Комбинация из таких зеркал может обеспечить также поворот изображения.

Все зеркальные поверхности должны быть совершенно плоскими, так как лишь при этом условии обеспечивается хорошая 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.

Зеркала должны быть чистыми и свободными от пыли. 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. 4.1) соотношением

$$1/S + 1/S' = 2/r,$$

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

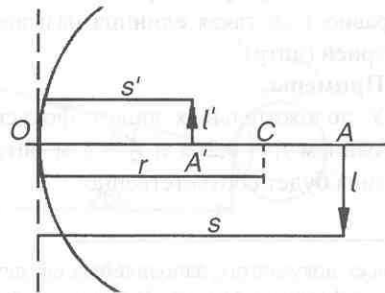


Рис. 4.1. Схема формирования изображения сферическим зеркалом

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:

- 1) положительные (собирающие);
- 2) отрицательные (рассеивающие).

Линзы отличаются одна от другой 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 поверхностей имеет меньшее фокусное расстояние и большую оптическую силу. Следовательно, оптическая сила линзы обратно пропорциональна заднему фокусному расстоянию

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

где Φ – 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 (дптр)¹.

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 $f' = -0,2$ м 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:

- 1) по оптическим данным;
- 2) характеру действия в системе, состоящей из корригирующих линз и оптического аппарата глаза;
- 3) конструктивным особенностям.

Все средства коррекции зрения могут быть разделены на две группы: одноэлементные и многоэлементные. К одноэлементным относятся очковые и контактные линзы, однолинзовые лупы, диафрагмы различных видов; к многоэлементным – телескопические системы, многолинзовые лупы, проекционные системы, катоптрические системы. Последние изменяют направления хода лучей. Они состоят из призм 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.

¹ Во всех документах, заполняемых офтальмологом, рефракцию (см. гл. 2) принято обозначать буквой "D", но по ГОСТу диоптрия обозначается сокращенно "дптр".

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 3 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 производится вакуумным способом. Нанесение просветляющих пленок можно производить на линзах любых рефракций.

Лицу, использующему очки, следует знать правила их использования:

- 1) очки на стол можно положить только на ребро рамки, чтобы линзы не касались поверхности стола и не царапались;
- 2) очки надо хранить в футляре;
- 3) аккуратно обращаться с оправой.

Если оправа изнасилась, линзы перекошились, положение очков на лице неправильное, следует сменить оправу или ее отремонтировать.

4.2. ЛУПЫ

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 Γ , 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. 4.2), т.е. увеличение

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

где

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

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

Таким образом увеличение Γ лупы, при отсутствии аккомодации глаза, определяется отношением

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

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

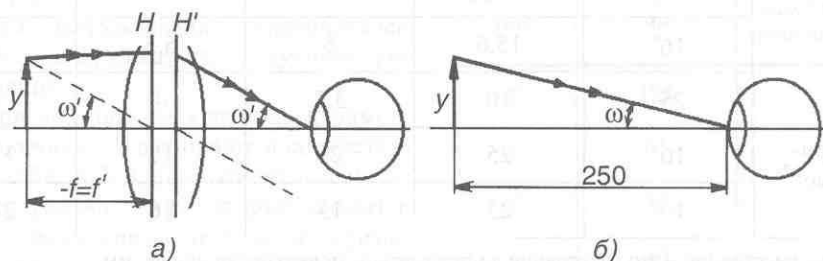


Рис. 4.2. Схема для вывода формулы видимого увеличения лупы

Промышленность выпускает лупы общего назначения различных типов и конструкций: складные, карманные, измерительные, часовые, лупы с ручкой и др. Основные параметры складных и измерительных луп приведены в табл. 4.1.

Лупы с ручкой выпускаются с увеличением: $2\times$; $2,5\times$; $3\times$ и $5\times$.

Из таблицы видно, что фокусные расстояния луп и их рабочие расстояния приблизительно одинаковые, а диаметр поля зрения меньше фокусного расстояния. Линейное поле $2u$ с удовлетворительным качеством изображения для одиночной линзы не превышает $2f'$.

Такое соотношение приводит к тому, что при контроле поверхности большого

размера и использовании 16-кратной лупы, линейное поле зрения которой 6,5 мм, такой контроль занял бы несколько часов, поэтому сначала надо использовать лупу с небольшим увеличением и выявить подозрительные места в объекте контроля, а затем исследовать их лупой с большим увеличением.

Чтобы максимально использовать возможность лупы, ее всегда 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 отраженного от поверхности изделия света.

4.1. Основные параметры луп

Наименование	Увеличение (кратность)	Фокусное расстояние, мм	Свободный световой диаметр линзы, мм	Линейное поле линзы, мм	Рабочее расстояние* ¹
Общего назначения (складные, карманные)	$2,5\times$	100	36	95	98
	$4\times$	62,5	29	45	54
	$6\times$	41,7	22	30	35
	$7\times$	35,7	20	25	33
	$10\times$	25	13	15	21
	$10\times$	25	8	12	13
	$20\times$	12,5	6	6	10
	$16\times$	15,6	5	6,5	7
	$25\times$	10	3,7	4	3
Измерительные* ²	$10\times$	25	26	17	17,5
	$10\times$	25	13	16	21,5

*¹ Рабочее расстояние – это расстояние до предмета от поверхности линзы, мм.

*² Измерительные лупы имеют сетку со шкалой, цена деления которой равна 0,1 мм.

Для устранения хроматической аберрации (цветного обрамления) лупы с достаточно большим увеличением должны быть составными. Они обычно представляют собой склеенный дуплет или триплет, материал линз которых выполнен из оптических стекол разной марки. Так, лупа Штейнгеля (апланат, в котором исправлены сферические и хроматические аберрации и кома) (рис. 4.3, а) состоит из двояковыпуклой кронуевой линзы и двух отрицательных флинтовых менисков.

Такая лупа имеет увеличение $6 \dots 12,5^{\times}$ и угловое поле 20° . Более совершенными лупами с большим увеличением $10 \dots 40^{\times}$ являются четырехлинзовые анастигматические системы, т.е. системы, в которых исправлены астигматизм, кривизна поля, сферическая и хроматическая аберрации и кома. Путем увеличения числа линз и применения различных сортов стекла удается получить анастигматы с большим полем зрения (рис. 4.3, б).

Международный стандарт ISO/FDIS 3D 58: 1997 классифицирует увеличители (лупы) как средства визуального контроля на следующие типы:

1. Одноэлементные – с увеличением до 4^{\times} (тип А).
2. Многоэлементные – с увеличением до 10^{\times} (тип В).
3. Стереоскопические.
 - 3.1. Бинокулярные, обычно с большим рабочим расстоянием (тип С.1).
 - 3.2. Двоуклярные (тип С.2).
4. Увеличители в виде вогнутого зеркала с отражателем – с увеличением до 6^{\times} (тип D).

При использовании увеличителей следует придерживаться следующих рекомендаций.

При визуальном контроле параметры увеличителей выбирают в соответствии с табл. 4.2. Одноэлементные и составные увеличители, которые держат в руке, с увеличением от 2^{\times} до 4^{\times} применимы для широкой номенклатуры изделий. Более высокое увеличение часто неэффективно по следующим причинам:

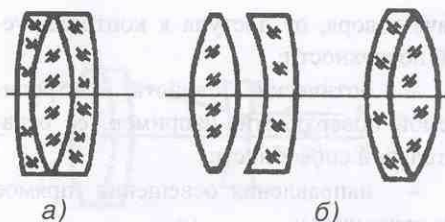


Рис. 4.3. Виды луп:

а – апаланат; б – анастигмат

– большое увеличение сокращает как рабочее расстояние, так и расстояние между глазом и линзой;

– указанные выше короткие расстояния, когда объект контроля рассматривают только одним глазом, приводят к усталости оператора;

– при уменьшенном поле зрения значительно увеличивается длительность контроля;

– при уменьшенной глубине поля зрения трудно оценить пространственные соотношения контролируемой поверхности.

Оптимальный уровень освещенности контролируемой поверхности зависит, главным образом, от следующих факторов:

– относительного расположения контролируемого объекта, глаза и источника света, например, от удобства или,

4.2. Зависимость между полем зрения, рабочим расстоянием и увеличением

Увеличение	Поле зрения, мм	Рабочее расстояние, мм (приблизительно)
2^{\times}	125	140
4^{\times}	65	62
8^{\times}	18	31
10^{\times}	14	25
15^{\times}	10	13

иначе говоря, от доступа к контролируемой поверхности;

- оптических свойств контролируемой поверхности, например, ее отражательной способности;
- направления освещения (прямое или наклонное);
- световых характеристик оптических систем.

Оптимальное расположение объекта, глаза и источника света. Идеальным расположением считается такое, при котором контролируемую поверхность или объект можно наклонять в зависимости от характера освещения так, чтобы контролируемую поверхность можно было бы рассматривать под различными углами с возможностью изменения ее освещенности. И, наоборот, если объект контроля неподвижен, то нужно изменять положение как глаза, так и источника света.

Оптические свойства контролируемой поверхности. Поиск трещины в стальной поковке или сварном соединении после дуговой сварки может потребовать освещенности в 5000 люкс, но поиск трещины на полированной поверхности может быть эффективен при освещенностях значительно меньших 5000.

Важной характеристикой является *отраженная блескость* – характер отражения светового потока от рабочей поверхности в направлении глаз работающего, определяющий снижение видимости вследствие чрезмерного увеличения яркости рабочей поверхности и вуалирующего действия, снижающего контраст между дефектом и фоном.

Как объект контроля, если он небольшой, так и поверхность, на которой он размещен, должны иметь примерно одинаковую отражательную способность.

Направление освещения. Направление освещения должно определяться отражательной способностью контролируемой поверхности и целью контроля. Изме-

нение освещенности от периферии поля зрения до его центра не должно превышать 1:3.

Световые характеристики оптических систем. Увеличители типа С.1 с достаточно большими объективами концентрируют световой поток и особенно полезны при недостаточных освещенностях контролируемых поверхностей, т.е. в местах производства работ вне зданий. Потери света могут быть уменьшены за счет использования просветленных линз.

4.3. ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При визуальном контроле далеко расположенных поверхностей, например, отливок, изделий аэрокосмической техники широко используются телескопические системы (лупы, бинокли и т.п.).

Эти системы 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. 4.4), 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.п. Конструктивно эти детали могут быть отнесены как к объективной, так и к окулярной части.

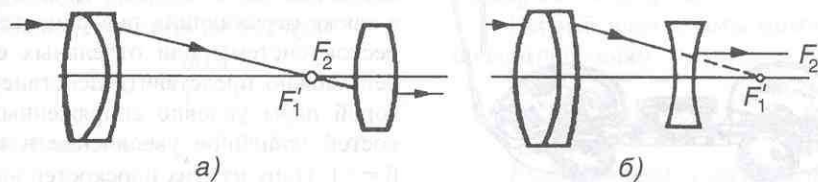


Рис. 4.4. Схемы зрительных труб:

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 $2 \dots 8^{\times}$ с полем зрения $20 \dots 5^{\circ}$.

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

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

Стереоскопические и бинокулярные телескопические системы. Наблюдение в бинокулярные телескопические трубы уменьшает утомление глаз и облегчает глубинное восприятие. Для невооруженного глаза глубинное восприятие возможно на расстоянии не более 1350 м. При наблюдении в бинокулярную зрительную трубу радиус стереоскопического зрения увеличивается во столько раз, во сколько раз база B трубы, т.е. расстояние между осями объективов, 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.

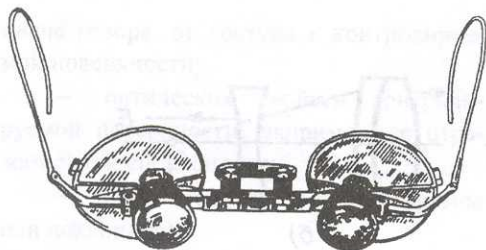


Рис. 4.5. Лупа стереоскопическая бинокулярная

На рис. 4.5 показана стереоскопическая лупа, предназначенная для выполнения достаточно тонких зрительных работ.

Лупа дает стереоскопическое изображение предмета: увеличение $-2\times$, расстояние до рассматриваемого предмета -182 мм, диаметр поля зрения -30 мм.

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

4.4. МИКРОСКОПЫ

Микроскоп, как и лупа, предназначен для наблюдения близко расположенных предметов. На рис. 4.6 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.

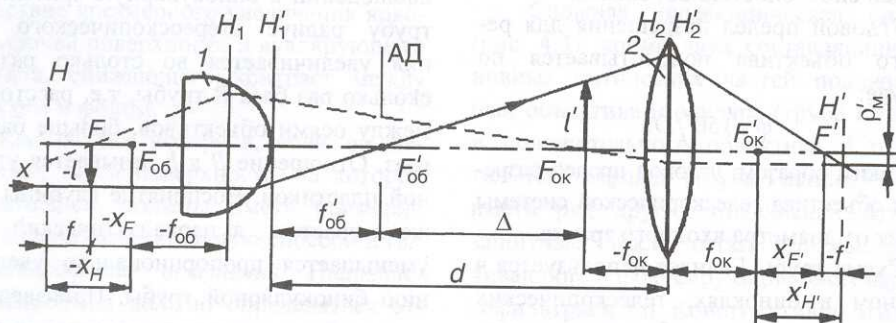


Рис. 4.6. Схема оптической системы микроскопа

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.

С целью упрощения рисунка объектив и окуляр заменены простыми линзами.

К основным характеристикам микроскопа относят видимое увеличение Γ_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 у 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 δ_A $-$ входной апертурный угол; n $-$ показатель преломления иммерсионной жидкости, иногда помещаемой между рассматриваемым предметом и микрообъективом.

С достаточной степенью приближенности диаметр выходного зрачка микроскопа можно вычислить по формуле

$$2\rho'_m = \frac{500A}{\Gamma_m}$$

Так, например, если $\Gamma_m = 500 A$, то

$$2\rho'_m = 1 \text{ мм.}$$

Чтобы определить величину поля зрения всего микроскопа в пространстве, необходимо линейное поле зрения окуляра $2l_{\text{ок}}$ разделить на увеличение объектива $\beta_{\text{об}}$

$$2l = 2l_{\text{ок}} / \beta_{\text{об}}$$

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 может быть оценена выражением

$$T_r = \frac{250\varepsilon}{A\Gamma_m}$$

где ε – 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; λ – длина волны света, в котором проводится наблюдение.

Полная глубина резкости определяется суммой $T = T_r + T_b + T_a$.

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

$$T_r = \frac{340n}{A\Gamma_m} \text{ мкм или } T_r = \frac{1}{7A\Gamma_m} \text{ мм.}$$

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. Чтобы полностью использовать разрешающую способность микроскопа, определяемую последней формулой, необходимо иметь увеличение всей системы микроскопа в видимой области спектра в пределах

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

Значения Γ_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. Оптическая длина тубуса Δ – это расстояние от заднего фокуса объектива микроскопа до переднего фокуса окуляра (рис. 4.6); 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 стандартизована 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 микрообъектива 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 волны 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 $120\times$ и числовую апертуру от 0,01 до 1,4. Объективы-ахроматы с увеличением от 5 до $10\times$ и апертурой до 0,2 состоят из двух двухлин-

зовых склеенных компонентов. Объективы-монохроматы — имеют увеличение до $90 \dots 100\times$ и апертуру до 1,3 при глицериновой иммерсии.

В настоящее время промышленность выпускает объективы с плоской поверхностью изображения — планобъективы. Эти объективы имеют увеличенное поле по сравнению с обычными ахроматами и апохроматами. Планобъективы по степени коррекции делятся на планмонохроматы, планахроматы и планапохроматы.

Существующие в микроскопах окуляры можно разделить на две группы:

- 1) визуальные окуляры;
- 2) окуляры, применяемые в микрофотографии и микропроекторных устройствах.

Компоновка микроскопов. Компоновка оптических и механических узлов в большинстве микроскопов всех типов, за исключением металлографических, в общих чертах одинакова. На рис. 4.7 показан

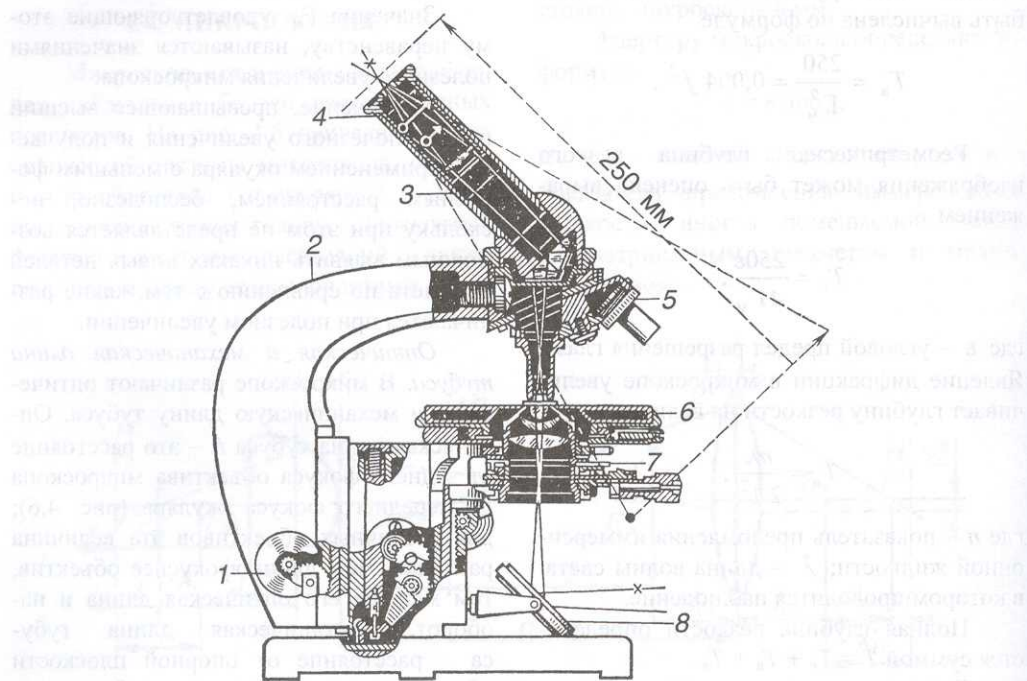


Рис. 4.7. Разрез и ход лучей в микроскопе

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 производится передвижением тубусодержателя с помощью грубого и микрометрического механизмов 1. Зеркало 8 направляет свет в конденсор микроскопа.

В зависимости от требуемого метода наблюдения применяются конденсоры различных типов: светлополюсный, темнополюсный, конденсор для наблюдения по методу фазового контраста и конденсор со смещающейся апертурной диафрагмой, дающей косое освещение для достижения максимальной разрешающей способности микроскопа.

Конденсор представляет собой двух- или трехлинзовую оптическую систему с апертурной диафрагмой. В особую группу можно выделить зеркально-линзовые и линзовые конденсоры, прозрачные для ультрафиолетовых лучей и применяющиеся в ультрафиолетовых микроскопах.

Типы микроскопов и методы оптической микроскопии определяются либо областью применения, либо методом исследования. В зависимости от круга решаемых задач микроскопы могут быть учебными, рабочими, лабораторными, исследовательскими и универсальными. В наиболее простых моделях имеется, как правило, ограниченный выбор окуляров и объективов; в сложных моделях микроскопов применяют широкий набор наиболее совершенной оптики, имеются штатив жесткой конструкции, встроенный осветитель, предметный стол с двухкоординатным перемещением препарата, приспособления для различных взаимодополняющих методов исследования, устройства для микрофотографии, микрофотометрии и др.

Структуру любого объекта (препарата) можно различить, если разные его частицы по-разному поглощают и отражают свет, либо отличаются одна от другой (или от среды) показателями преломления. Эти различия обуславливают разницу амплитуд или фаз световых волн, прошедших через разные участки препарата, от чего, в свою очередь, зависит контрастность изображения. В зависимости от свойств изучаемого объекта и задач исследования существуют различные методы наблюдения, дающие несколько отличающиеся изображения объекта.

Метод светлого поля в проходящем свете наиболее распространен. Он используется для исследования прозрачных объектов с включенными в них поглощающими частицами и деталями. Пучок света, проходя через непоглощающие зоны препарата, дает равномерно освещенное поле. Абсорбирующая частица на пути пучка света частично поглощает его, частично рассеивает, вследствие чего амплитуда прошедшего через частицу света будет меньше и частица выглядит на светлом фоне темным пятном. Контраст изображения микроструктуры объекта тем больше, чем большим поглощением в видимой области спектра обладает абсорбирующая частица.

Метод светлого поля в отраженном свете применяют для наблюдения непрозрачных объектов, например, шлифов металлов, сплавов, рудных минералов. Структура препарата видна вследствие различия отражательной способности его элементов. Препарат 1 (рис. 4.8) освещается через объектив 2 (выполняющий одновременно роль конденсора) с помощью опак-иллюминатора, в котором устанавливается полупрозрачная пластинка 3 или призма 4.

Метод темного поля в проходящем свете применяют в биологии, главным образом для наблюдения прозрачных неабсорбирующих объектов, невидимых при методе светлого поля.

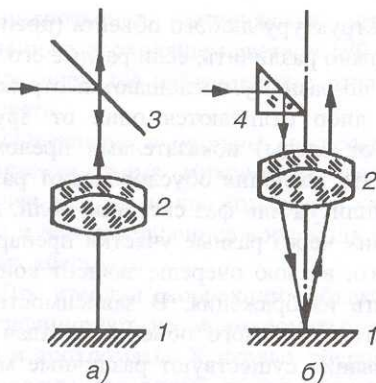


Рис. 4.8. Метод светлого поля в отраженном свете:

а – с полупрозрачной пластиной 3;
б – с призмой 4; 1 – препарат; 2 – объектив

Метод темного поля в отраженном свете (рис. 4.9) осуществляется при освещении препарата 1 (например, шлифа металла) сверху с помощью зеркал 4 и специальной кольцевой системы 3, расположенной вокруг объектива и называе-

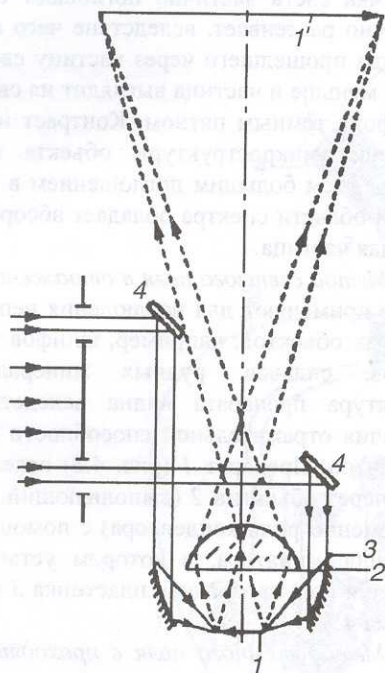


Рис. 4.9. Метод темного поля в отраженном свете:

1 – препарат; 2 – объектив; 3 – эпикондсор;
4 – кольцевое зеркало

мой эпикондсором. Изображение 1' здесь создается только лучами, рассеянными объектом (пунктирные линии).

Рабочие микроскопы, используемые в цеховых условиях, имеют увеличение порядка $40\times$, 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 трещин, пузырей и других дефектов, для измерения небольших отверстий в штампах, шаблонах и т.п.

Измерительные микроскопы используются в машиностроении 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 линейных размеров от 0,01 мм до 0,001 мм, угловых – $1' \dots 10'$, предел измерения линейных величин 50 ... 200 мм.

Микроскопы металлографические используются для исследования микроструктуры металлов и других непрозрачных объектов. Образцы металла – шлифы – предварительно полируются и протравливаются, благодаря чему зерна структуры становятся отличными друг от друга.

Особенностью оптической системы металлографических микроскопов является то, что они предназначены для работы только в отраженном свете. Объективы металлографических микроскопов проектируют изображение шлифа на бесконечно удаленную плоскость (так называемая длина тубуса бесконечность) и работают

совместно с дополнительной линзой, переносящей изображение в фокальную плоскость окуляра.

Металлографические микроскопы, как правило, отличаются от других типов микроскопов тем, что у них предметный столик расположен над объективом. Благодаря этому образец устанавливается на столике исследуемой полированной поверхностью вниз, а остальная его поверхность может иметь произвольную форму. Такое расположение столика позволяет также помещать на нем громоздкие образцы.

Набор ахроматических и апохроматических объективов, окуляров и гомалов (отрицательные оптические системы) обеспечивает общее увеличение микроскопа при визуальном наблюдении от $100\times$ до $1350\times$, при фотографировании от $45\times$ до $2000\times$. При работе в светлом поле объектив служит и конденсором. Для темнопольного освещения применяются зеркальные параболические конденсоры.

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 пластинки (фазового кольца) переводят в амплитудные изменения (ам-

плитудный рельеф), воспринимаемые глазом как изменения интенсивности.

Препарат 3 в фазово-контрастном микроскопе (рис. 4.10) освещается через кольцевую апертурную диафрагму 1, установленную на переднем фокусе конденсора 2. Изображение ее получается в заднем фокусе объектива 4, где помещается прозрачная пластинка 5 с фазовым кольцом, размеры которого равны размерам изображения диафрагмы. Фазовое кольцо представляет собой вытравленную в пластинке канавку или нанесенную на нее тонкую пленку.

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

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 $(1/300)\lambda$. К достоинствам метода следует отнести то, что при контроле объект не нужно перемещать вручную.

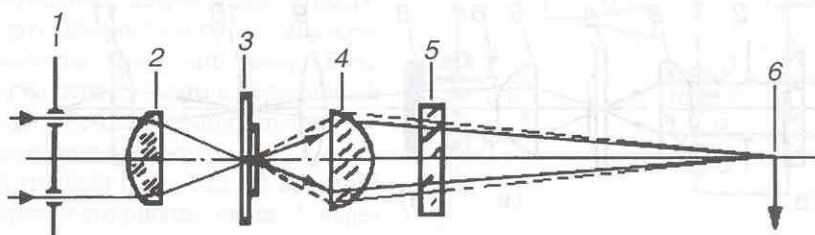


Рис. 4.10. Метод фазового контраста в проходящем свете:

1 — апертурная диафрагма; 2 — конденсор; 3 — препарат; 4 — объектив; 5 — фазовая пластинка; 6 — изображение

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

При ортоскопическом ходе лучей (рис. 4.11, *а*) в фокальную плоскость окуляра *11* проецируется изображение *4'* препарата *4*. Наблюдаемая при этом интерференция поляризованных лучей локализована в плоскости препарата. Пучок лучей, прошедший через поляризатор *1*, ограничивается апертурной диафрагмой *2* конденсора *3*; с помощью поворотного анализатора *8* и компенсаторов различных типов *7* производится измерение величины двойного лучепреломления, углов поворота плоскости поляризации, определение углов погасания и других характеристик.

При коноскопическом ходе лучей (рис. 4.11, *б*) апертурная диафрагма *2* открывается, а наблюдение интерференци-

онной картины, локализованной в бесконечности, производится с помощью линзы Бертрана *9*, которая проецирует выходной зрачок *6* в фокальную плоскость *10* окуляра. Получаемые при этом изображения дают возможность определить знак двойного лучепреломления, количество осей объекта, их ориентацию и величину угла между осями.

Наибольшее распространение поляризационная микроскопия получила в минералогии и кристаллографии, но применяется также и в металлографии.

Стереоскопическая микроскопия позволяет видеть предмет объемным за счет рассматривания его каждым глазом под разными углами. В стереомикроскопах по схеме Грену (рис. 4.12) для этой цели служат две самостоятельные оптические системы, образующие между собой угол 15° , что соответствует расстоянию конвергенции 250 мм.

В однообъективных стереомикроскопах разные углы зрения для глаз образуются за счет использования перифериче-

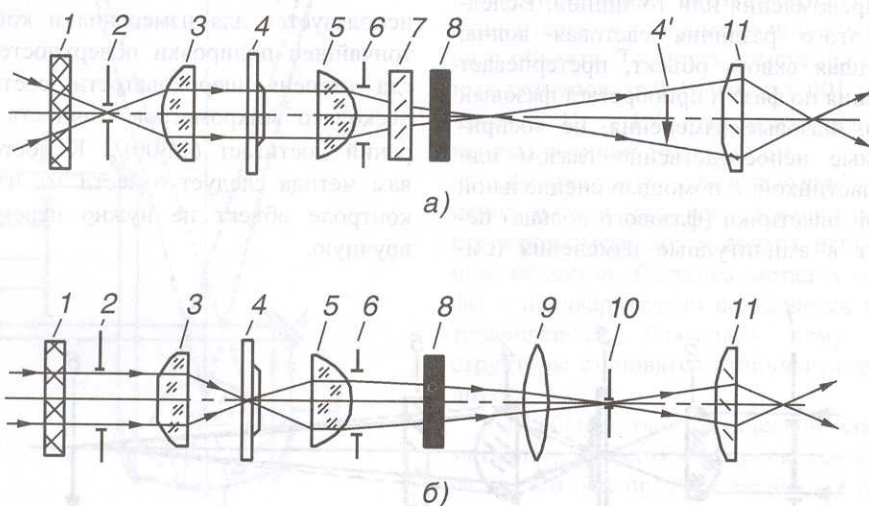


Рис. 4.11. Принципиальная оптическая схема поляризационного микроскопа:

а – для ортоскопического наблюдения; *б* – для коноскопического наблюдения; *1* – поляризатор; *2, 6* – диафрагмы; *3* – конденсор; *4* – препарат; *5* – объектив; *7* – компенсатор; *8* – анализатор; *9* – линза Бертрана; *10* – фокальная плоскость; *11* – окуляр

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

В телевизионном микроскопе с белым лучом (рис. 4.13, б) используется

оптическое сканирование препарата движущимся лучом света. В этом случае микроскоп, состоящий из объектива 3 и окуляра 2, работает в обратном ходе лучей и проецирует на препарат 4 сильное уменьшенное изображение растра катодной-лучевой трубки 1, служащей источником света (источником света может быть и лазер с быстродействующим сканирующим устройством). Приемником света является фотомножитель 6, установленный под конденсором 5.

При такой схеме точки препарата освещаются последовательно по мере движения луча, а интенсивность прошедшего света пропорциональна пропусканию той точки препарата, где находится белый луч. Выходной сигнал с фотомножителя,

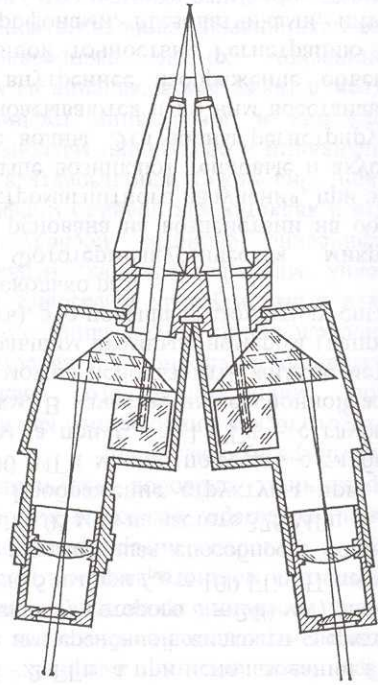


Рис. 4.12. Принципиальная схема стереомикроскопа по схеме Грену

схиз зон выходного зрачка. В приборах этого типа с помощью дополнительной оптической системы возможно изменение ступенчатого или плавного изменения увеличения без замены объектива и окуляров. Типичный диапазон увеличения в стереомикроскопах от 4^\times до 100^\times при рабочем расстоянии около 100 мм. При 10^\times — поле зрения около 25 мм.

Телевизионная микроскопия позволяет наблюдать микрообъекты на телеэкране. Микроскопы этого типа могут быть построены на основе схемы с передающей трубкой либо схем с белым лучом.

В телевизионных микроскопах с передающей трубкой (рис. 4.13, а) препарат 3 освещается источником света 1 через конденсор 2. Микрообъектив 4 и окуляр 5 создают действительное изображение препарата на фотослое передающей трубки 6, откуда изображение в виде электри-

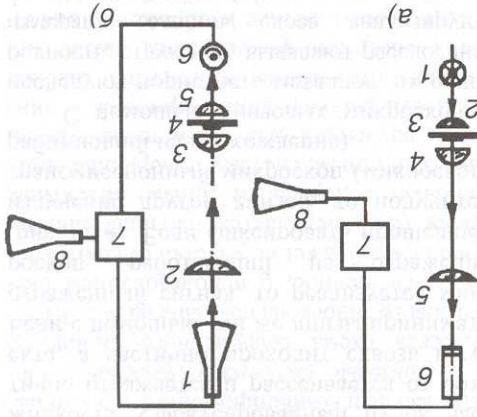


Рис. 4.13. Блок-схема телевизионного микроскопа: а — с передающей трубкой; б — с белым лучом

ки 6, откуда изображение в виде электри-

пропорциональный интенсивности прошедшего света, пройдя через электронную систему 7, управляет током электронного луча кинескопа 8. В результате на экране кинескопа воспроизводится изображение препарата. Схемы с бегущим лучом дают возможность наблюдать в течение длительного времени живые клетки в УФ-лучах, поскольку на облучение каждой точки препарата затрачивается малая доля времени всего кадра.

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: линзовые, фототермоакустические и лазерные.

В простейшем акустическом микроскопе ультразвуковая 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. 4.14). Если фиксировать прошедшее излучение другой линзой, то получится трансмиссионный микроскоп (микроскоп, работающий на прохождение).

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 сверхтекучего гелия (у которого $c = 240$ м/с) оно доходит до 5 нм при $f_{\text{раб}} = 100$ ГГц. Поверхностная разрешающая способность составляет 0,2 ... 0,05 мкм на частоте 375 МГц.

Изображение структуры при $f_{\text{раб}} = 100$ МГц можно получать с глубин до 1 мм, а при $f_{\text{раб}} = 1$ ГГц – с глубин до 5 мкм. 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 регистрируются, 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.

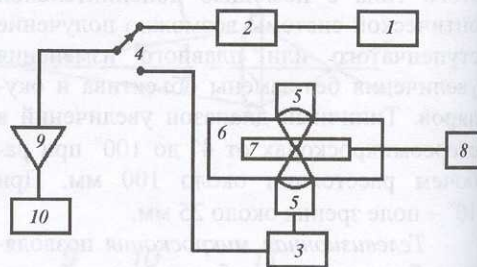


Рис. 4.14. Функциональная схема акустического микроскопа:

1 – генератор зондирующих эмитрических импульсов; 2 – излучающий (и принимающий в режиме отражения) пьезообразователь; 3 – принимающий (в режиме просвечивания) пьезообразователь; 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 использовании лазерных акустических микроскопов возбуждение акустических колебаний происходит с помощью импульса мощного лазера, а регистрация — с помощью интерферометра на маломощном 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 физико-механических свойств материалов (плотность, объемная сжимаемость, прочность, твердость, зернистость, пористость и т.д.).

4.5. ЭНДОСКОПЫ

Общие сведения. Эндоскопы или бороскопы — это смотровые приборы, построенные на базе волоконной и линзовой оптики и механических устройств.

Принцип действия эндоскопов заключается в осмотре объекта контроля с помощью специальной оптической системы (часто типа микроскоп, телескоп), позволяющей передавать изображение на значительные расстояния (до нескольких десятков метров) с отношением эффективной длины эндоскопа L (вводимой в объект контроля части корпуса) к его наружному диаметру d : $L/d \gg 1$.

Эндоскопия возникла в результате сближения, взаимопроникновения и частичного слияния волоконно-линзовой оптики, с одной стороны, и визуального контроля, с другой. Эта быстро развивающаяся область визуально-оптического контроля представлена большим количе-

ством теоретических работ и многочисленными образцами оригинальных и высокотемпературных оптических систем, устройств и приборов различного назначения. Многие из этих оптических средств выпускаются промышленностью серийно.

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).

Использование в эндоскопах холодных источников света высокой яркости открыло безопасный метод контроля поверхностей в полостях, содержащих взрывчатые материалы, жидкости или газы, а также обеспечило качественное фотографирование, киносъемку и телевизионную передачу изображения указанных поверхностей при малых размерах входного отверстия контролируемой полости.

Эффективные методы жидкого и газового охлаждения позволяют использовать эндоскопы в горячих местах ядерных реакторов, ракетных установок и металлургических печах при температуре до 2000 °С.

Существуют линзовые, волоконно-оптические и комбинированные эндоскопы.

Линзовые (жесткие) эндоскопы. Оптическая схема современного типичного линзового эндоскопа показана на рис. 4.15.

Освещенное, с использованием световода, изображение участка объекта контроля (ОК) передается наблюдателю по цепочке, содержащей линзы объектива, иногда и призм, систему поворачивающих линз, служащих для увеличения эффективности рабочей длины прибора, и линз окуляра. Эндоскопы этого типа снабжаются системой фокусировки, позволяющей получать резкое изображение анализируемого участка ОК как в ближней, так и в дальней зоне. Управляя поворотной ручкой, можно поворачивать трубку на угол более 360° и легко изменять анализируемый участок ОК.

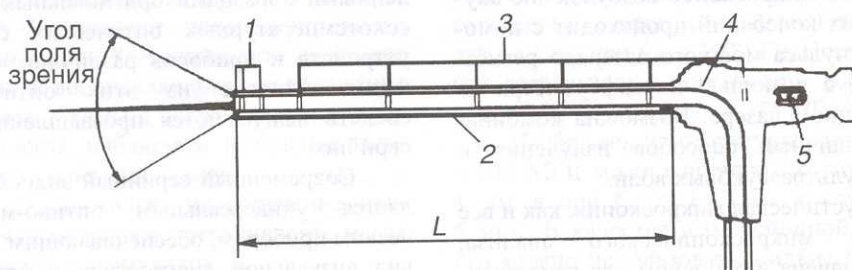


Рис. 4.15. Структурная схема линзового (жесткого) эндоскопа:

1 – объектив; 2 – металлическая трубка; 3 – система оборачивающих линз; 4 – световод, передающий световую энергию от источника в металлическую трубку для освещения ОК; 5 – окуляр

Большое разнообразие приборов рассматриваемого типа можно получить за счет комбинации ряда их конструктивных параметров таких, как тип направления визирования эндоскопа (рис. 4.16), диаметр и эффективная длина трубки (соответственно, например, в пределах 6 ... 12 мм и 200 ... 1000 мм), угла поля зрения (в пределах 10 ... 60°). Увеличение линзовых эндоскопов обычно находится в пределах 0,5 ... 5[×]. Используя соответствующие оптические адаптеры на выходе эндоскопов таких типов можно подключать фото- или киноаппараты, телевизионные камеры и поляроидные системы.

Вводимые в ОК элементы линзового эндоскопа работоспособны при температурах от -40 до +150 °С и под давлением

4 атм. Водонепроницаемая конструкция трубки эндоскопа позволяет вести контроль в воде и масле. Линзовыми эндоскопами можно контролировать стены зданий, поверхности разнообразных трубопроводов, авиационные двигатели, автомобильные литые детали и т.п. и обнаруживать 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.

Линзовые эндоскопы обычно представляют собой жесткую конструкцию. Но уже созданы приборы, имеющие участки корпуса с гибкой оболочкой, изгибающиеся в пределах 5 ... 10°.

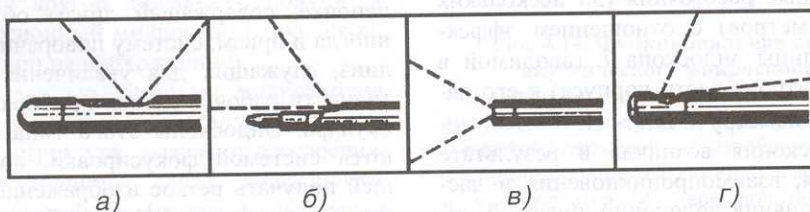


Рис. 4.16. Типы направления визирования эндоскопов:

а – с боковой; б – косоприцельный; в – прямонаправленный; г – ретроспективный

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. 4.17).

Вещество, обладающее указанным свойством, называется селфоком. Волокно из такого вещества имеет диаметр примерно 1 мм, что делает возможным создавать тонкие жесткие эндоскопы с диаметром от 1,7 до 2,7 мм с эффективной длиной 100 ... 200 мм, глубиной изображаемого пространства 1,0 мм ... ∞, углом поля зрения 50 ... 70°, что позволяет вести детальный осмотр ОК как в ближней, так и в дальней зоне со значительным по величине линейным полем в пространстве ОК.

Модификации минибороскопа могут быть изготовлены по трем направлениям визирования: с прямонаправленным обзором (0°), косопривцельным (14°), боковым (90°). Такие бороскопы при рабочих температурах могут быть использованы для контроля литья, осмотра внутренних поверхностей тонких трубок, контроля износа сопел и др.

Волоконно-оптические эндоскопы. Возможности технической эндоскопии

существенно расширены, благодаря созданию волоконно-оптических элементов.

Волоконные световоды представляют собой набор тонких стеклянных светопроводящих волокон диаметром 9 ... 30 мкм, собранных в жгут. Каждый элементарный световод (волокно с большим показателем преломления) покрыт снаружи тонким слоем (1 ... 2 мкм) стекла с более низким показателем преломления.

На границе волокно-покрытие происходит полное внутреннее отражение света, входящего в основное волокно, что обеспечивает его прохождение по световоду с минимальным ослаблением (рис. 4.18). При значительных размерах световода число отражений бывает более 10^6 . Это приводит к ослаблению сигнала, которое связано с длиной световода экспоненциальной зависимостью.

Максимальный угол u_{\max} , под которым свет может войти в световод без нарушения условий полного внутреннего отражения, определяется по формуле

$$u_{\max} = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2},$$

где u – апертурный угол; n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки. При $n_1 = 1,7 \dots 1,8$ и $n_2 = 1,5$ $u_{\max} \approx 60^\circ$.

Коэффициент пропускания световодов составляет примерно 40 ... 50 % на 1 м длины.

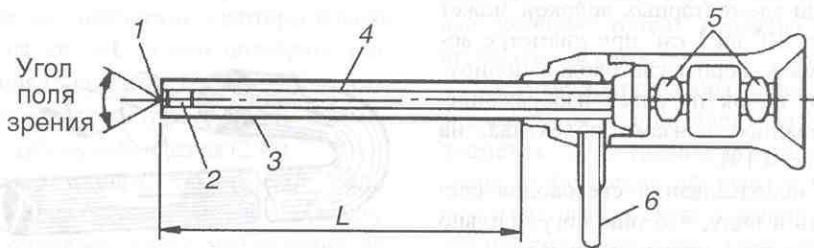


Рис. 4.17. Структурная схема минибороскопа:

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

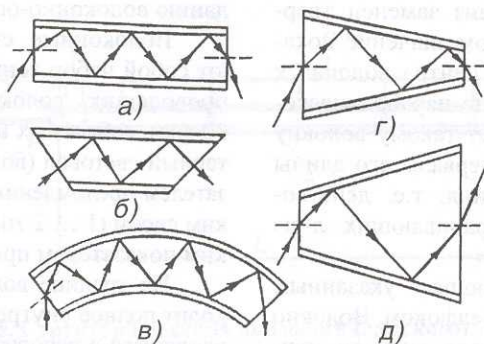


Рис. 4.18. Структурные схемы волоконных световодов:

a – с прямыми торцами; *б* – с косыми торцами; *в* – изогнутые; *г* – фокен (уменьшает размеры передаваемого изображения); *д* – афокен (увеличивает размеры передаваемого изображения)

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.

Световоды для передачи световой энергии изготавливают из беспорядочно уложенных волокон диаметром около 30 мкм.

Для передачи изображения используют пучок волоконно-оптических элементов с упорядоченной структурой. При этом число элементарных волокон может превышать 10^6 на 1 см^2 при диаметре волокон 9 мкм. Торцы световодов полируют. Такой пучок передает изображение, сформированное линзами объектива, на окуляр (рис. 4.19).

При использовании световодов следует иметь в виду, что они могут сильно деполаризировать проходящий свет.

Разрешающая способность серийных световодов составляет в среднем 15 ... 20 мм^{-1} . Лучшие образцы могут иметь разрешающую способность до 50 мм^{-1} .

В целом волоконные световоды, используемые в эндоскопах, пока уступают по качеству изображения линзовым системам. Однако разрабатываются меры по устранению мозаичной структуры изображения в световодах и повышению их разрешающей способности.

Волоконные световоды обладают преимуществами, делающими их незаменимыми при решении многих задач. Так, они 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.

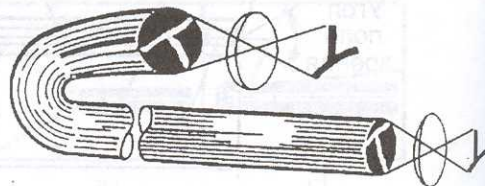


Рис. 4.19. Схема формирования и передачи изображения пучком волоконно-оптических элементов с упорядоченной структурой

Волоконные осветители "холодного" света могут иметь торцы любой формы, например кольцевой, что обеспечивает высокую равномерность освещения объекта.

Одна из оптических схем гибкого волоконно-оптического эндоскопа (фиброскопа) показана на рис. 4.20.

Источник света 1 (обычно ксеноновый или галогенный, мощностью 150 ... 300 Вт) с помощью конденсора 2 и теплового фильтра 3 освещает торец осветительного жгута 4, который оптически связан с осветительным жгутом, размещенным внутри эластичного корпуса эндоскопа и подсвечивает объект контроля 10. Изображение поверхности объекта 10 при помощи оптических элементов адаптера 9 на дистальном конце фиброскопа, регулярного световода 5 и окуляра 6 анализируют визуально или фотографируют (переносят на первичный преобразователь замкнутой телевизионной системы), используя соответствующие разного типа адаптеры (на рис. 4.20 не указаны) на выходе фиброскопа.

Конструктивно такие эндоскопы выполняют в виде блока осветителя с осветительным световодом длиной 1,5 ... 2,5 м и собственно эндоскопа с эффективной длиной 0,5 ... 6 м. Некоторые модели имеют механизм дистанционной фокусировки оптики адаптера 9 и изгиба передней части (длиной до 100 мм) 8 эндоскопа в пределах 120° при диаметре 0,5 ... 14 мм.

Заменяя оптические адаптеры с одного типа на другой, можно подобрать угол поля зрения (в пределах $10 \dots 120^\circ$), направление визирования (прямой или боковой обзор) и глубину наблюдения (2 мм ... ∞).

Можно создать технические эндоскопы с параллельным соединением жгутов для одновременного наблюдения нескольких точек объекта.

Особенности оптических схем эндоскопов. Как это видно из вышеизложенного, эндоскопы – это оптические устройст-

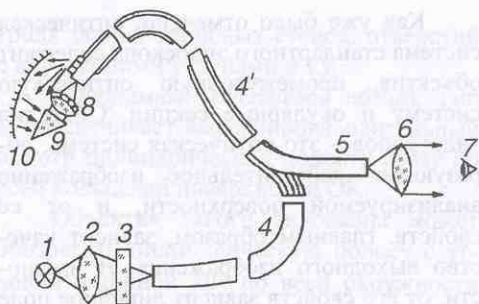


Рис. 4.20. Оптическая схема гибкого эндоскопа (фиброскопа):

1 – источник света; 2 – конденсор; 3 – тепловой фильтр; 4 – внешний осветительный световод; 5 – информационный световод для передачи изображений; 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

ва, содержащие как ахроматические (исправлены сферические и хроматические aberrации для двух длин волн), так и простые элементы, которые формируют и передают информацию о качестве внутренних поверхностей ОК. Из наблюдательного прибора эндоскоп превращается в прибор для точных измерений. Осветитель ОК обычно размещается со стороны объектива.

Технический прогресс в промышленной эндоскопии неразрывно связан с решением таких важных задач, как большое поле зрения, отсутствие искажений изображения, точная передача цветов и необходимая яркость.

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.

Как уже было отмечено, оптическая система стандартного эндоскопа содержит объектив, промежуточную оптическую систему и окулярные секции. Объектив эндоскопов – это оптическая система, образующая действительное изображение анализируемой поверхности, и от ее свойств, главным образом, зависит качество выходного изображения. В частности, от его свойств зависит линейное поле зрения и количество света, собираемое эндоскопом.

Промежуточные линзы, концентрируя световое излучение, попадающее в объектив, обеспечивают прохождение пучка света через телескопическую трубку с минимальными потерями. От качества промежуточной оптической системы зависит четкость изображения и верность в передаче цвета. Поэтому ее элементы обычно обладают свойством ахроматичности.

В зависимости от длины телескопического участка изображение требует горизонтального, вертикального, либо двойного перевертывания (инверсии). Такое преобразование осуществляется в окулярном устройстве с помощью корректирующих линз в эндоскопах малого диаметра или оборачивающих линз в эндоскопах большого диаметра. Часто окулярные устройства бывают сменной конструкции на различные увеличения.

Глубина изображаемого пространства (поля зрения, наблюдения) обратно пропорциональна числовой апертуре $A_1 = n \sin \sigma_A$, где соответственно n – коэффициент преломления ($n = 1$ для воздуха); σ_A – апертурный угол в пространстве предметов. Поскольку числовая апертура у оптических систем эндоскопов значительно меньше, чем, например, числовая апертура у оптических систем микроскопов, то глубина изображаемого пространства у них значительна. Это позволяет использовать окулярные системы эндоскопов (при малых и средних диаметрах) с фиксированным фокусным расстоянием.

Следует отметить, что угловое поле зрения у оптических систем эндоскопов обычно достаточно большое (более 40°), что, например, соответствует линейному полю около 20 мм на расстоянии 25 мм от линзы его объектива.

Увеличение Γ оптических систем эндоскопов можно записать в виде произведения

$$\Gamma = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3,$$

где $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – соответственно увеличения 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^\times при расстоянии ОК-объектив 80 мм будет иметь увеличение 4^\times при глубине наблюдения 40 мм.

Рабочее расстояние, при котором может быть надежно визуально проконтролирован ОК при достаточной яркости изображения его поверхности, зависит от коэффициента отражения поверхности, длины эндоскопа, типа и увеличения окулярного устройства, углового поля зрения, а также типа наблюдения (обзора его поверхности). Поэтому далее коротко рассмотрим особенности эндоскопов с различными типами обзора поверхностей ОК.

Прямо направленный (прямой) обзор. Тип I, дающий прямое (торцовое) наблюдение на угол визирования, применяется для контроля торца или дна канала, или штуцера (рис. 4.21). Эндоскопы с таким типом обзора имеют типичное угловое поле зрения около 45° (линейное поле зрения 20 мм на расстоянии 25 мм от линзы до поверхности ОК). Для освещения поверхности ОК в таких эндоскопах могут быть применены малогабаритные лампочки, расположенные по окружности, в центре которой имеется отверстие для прохождения отраженного от ОК света. Такая объективная часть не используется при малых рабочих расстояниях и при контроле небольшого участка в глухих отверстиях.

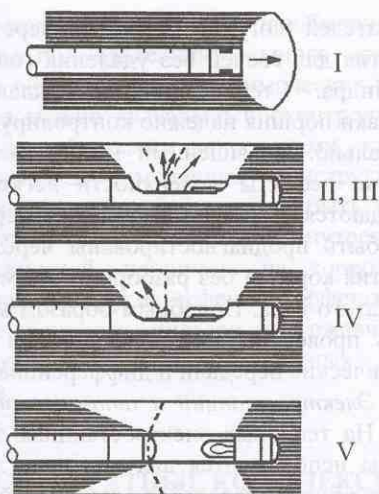


Рис. 4.21. Конструкции дистальных концов эндоскопов для различных типов направлений визирования:

- I – прямонаправленный;
 II и III – косопрямленный и боковой;
 IV – ретроспективный; V – панорамный

Косопрямленный вперед обзор. Тип II, дающий наблюдение, наклонное вперед на угол визирования 25 и 45° , применяется для контроля, например, сварных швов в торце. В таких эндоскопах источники света обычно монтируются на дистальном конце эндоскопа. Размер поля контроля можно увеличивать при вращении направления визирования относительно оптической оси эндоскопа.

Боковой обзор. Тип III, обеспечивающий боковой контроль с углом визирования 90° , используется при детальном контроле 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.

Ретроспективный обзор. Тип IV, обеспечивающий наклонные наблюдения назад на угол 135° , используется для кон-

троля задних торцовых стенок, отверстий с внутренними уступами и т.п.

Панорамный (кольцевой обзор). Тип V обеспечивает высокопроизводительный осмотр цилиндрической полости сразу по всей кольцевой поверхности ОК.

Объектив такого эндоскопа может обозревать цилиндрическую полосу с угловой шириной 30° по всей окружности отверстий.

4.6. ТИПИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭНДСКОПОВ

Машиностроительные цеха (механосборочные цеха). Эндоскопы различных типов и размеров используют в механосборочных цехах для контроля цилиндрических отверстий, пересекающихся отверстий, внутренней резьбы, чистоты внутренней поверхности и других недоступных участков, которые встречаются в обработанных деталях машин при их сборке. Специфическими узлами, где требуется такой контроль, в первую очередь, являются: ружейные и пулеметные стволы оружия всех калибров, станочные полости, гидравлические цилиндры и т.п. В инструментальных цехах и цехах покраски эндоскопы используются для исследования гладкости внутренних поверхностей резьб, выявления выбоин краски и т.п. В литейных цехах и цехах обработки давлением эндоскопы широко используются для просмотра внутренних поверхностей с целью обнаружения таких дефектов, как трещины, пористость, пузыри и т.п.

Отверстия, полученные при литье и обработке давлением, по сравнению с отверстиями, полученными резанием, отличаются по габаритам, шероховатости поверхности и форме сечения, что требует эндоскопов особой конструкции и специфических приемов работы: значительная глубина отверстий затрудняет использование стандартных эндоскопов из-за пониженной яркости изображения и ухуд-

шения разрешающей способности; более грубая поверхность требует перед визуальным контролем обязательной многократной механической и химической очистки; нецилиндричность формы сечения вызывает особые требования к конструкции центрирующих устройств и фокусирующих систем.

Авиационно-космическая промышленность. Надежность эксплуатации летательных аппаратов в значительной степени зависит от качества визуального контроля узлов двигателей, систем питания горючим, воздухом, систем управления и торможения.

Так, эндоскопы, спроектированные для ввода в камеру сгорания через отверстия в штуцере горелки, позволяют получить цветное изображение поверхности, в частности, определить качество сварного соединения без демонтажа двигателя.

С помощью эндоскопов можно эффективно контролировать втулки пропеллеров, передаточные шестеренчатые механизмы, гидравлические цилиндры, механизмы приземления. Лонжероны крыльев и распорки контролируются на наличие усталостных трещин, а заклепки и секции крыльев – на наличие коррозии.

Автомобильная промышленность. Эндоскопы можно эффективно использовать для контроля отливок и поковок, цилиндров после хонингования и т.п.

Недоступные места масляных систем маленьких помп, электрических двигателей и прочих механических и электрических конструкций могут быть легко исследованы без разборки. Эндоскопы могут быть широко использованы при решении многих трудных проблем визуального контроля при обслуживании и ремонте автомобилей, в частности, при диагностировании двигателей. Их можно вводить в отверстия узлов и осматривать состояние кулачков и шестерен, муфт и тормозов и других подвижных деталей с целью определения их износа, например, цилиндры

двигателей могут проверяться через отверстия для свечей без удаления головки цилиндра. Стенки цилиндра, клапаны, головки поршня надежно контролируются визуально. Повышенный износ, нагар и другие дефекты поверхности легко наблюдаются. Коленчатый вал и картер могут быть продиагностированы через отверстия корпуса без разборки и съема коленчатого вала. Подобным образом могут быть проверены механические или гидравлические передачи и дифференциал.

Электростанции и атомные объекты. На тепловых электростанциях эндоскопы используются для контроля лопаток турбин, генераторов, двигателей, насосов, конденсаторов, панелей управления и других электрических и механических элементов без демонтажа. Они активно применяются также при визуальном контроле бойлерных труб на точечную коррозию, накипь и другие дефекты. Эндоскопы, используемые для такой работы, обычно сконструированы секциями длиной 2 ... 3 м, которые могут пристыковываться друг к другу, давая прибор требуемой длины.

Эндоскопы и методика их использования при контроле внутренних поверхностей атомных реакторов без разборки с целью обнаружения волосовых трещин, коррозии и других дефектов имеют следующие особенности: в оптических системах почти всегда ставятся оптические элементы из специальных сортов стекла, не темнеющего под высокой лучевой нагрузкой; используются приборы большой вертикальной компоновки со сломанной оптической осью при значительном удалении окуляра по горизонтали от исследуемого загрузочного канала; почти все приборы способны работать при тепловых нагрузках до 150 °С, т.е. сразу же после выключения реактора.

Химическая и нефтехимическая промышленность. Испарительные конструкции, ректификационные блоки, камеры химических реакций, цилиндры, реторты,

печи, камеры сгорания, теплообменники, сосуды под давлением и много других типов оборудования для химических процессов можно визуально проконтролировать как обычными эндоскопами, так и эндоскопами измененных конструкций. Цилиндры и барабаны могут быть проконтролированы на состояние внутренних поверхностей, например, на коррозию, ржавчину и другие дефекты. Эффективен также контроль цистерн на ржавчину, коррозию, состояние выпускных клапанов.

4.7. АГРЕГАТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ДИСТАНЦИОННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Агрегатные комплексы дистанционного визуального контроля (АКДВК) широко используются в тех ситуациях, когда вредное излучение, температура или химическая среда представляют опасность для здоровья визуального контролера или, когда конфигурация ОК не позволяет непосредственно его контролировать. В состав АКДВК обычно входят: промышленная телевизионная установка (телевизионная система), световой прибор и системы позиционирования и транспортировки.

Телевизионная система. Совокупность оптических, электронных и радиотехнических устройств, служащих для передачи изображения с поверхности ОК на некоторое расстояние, образует телевизионную систему. В системе протекают следующие физические процессы.

Световое излучение, генерируемое световым прибором и отраженное от поверхности ОК, воздействует на первичный преобразователь, в котором оно преобразуется в электрические сигналы, передаваемые затем по каналу связи.

Во вторичном преобразователе принятые электрические сигналы преобразуются в световое изображение, непосредственно воспринимаемое глазом человека.

В качестве первичных преобразователей в АКДВК используются передающие телевизионные трубки (типа видикон, суперортикон) и передающие твердотельные матрицы. Каналом связи служат кабельные линии с электронными и радиотехническими устройствами. В качестве вторичных преобразователей используют главным образом электронно-лучевые приемные трубки (кинескопы).

Основным принципом передачи изображения в телевизионных установках является поэлементная передача значений интенсивностей отраженного от ОК светового излучения, осуществляемая путем развертки пространственно-временного поля ОК на передающей стороне и свертки изображения на приемной стороне. В рассматриваемых установках развертка изображения производится электронным пучком или последовательным считыванием зарядов с твердотельной матрицы. Пучок чаще всего имеет круглое сечение, его диаметр δ_1 , называют апертурой пучка. На приемной стороне во вторичном преобразовании синтез изображения осуществляется электронным пучком, имеющим апертуру δ_2 . Обычно, $\delta_1 > \delta_2$, так как значительное уменьшение δ_1 , понижает чувствительность системы.

Основные характеристики телевизионных систем условно можно разделить на две группы: общие (технические) и специальные.

Важные характеристики первой группы: 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 ν чередующихся черных и белых линий равной ширины, укладываемых на отрезке, равном ширине кадра, и наблюдаемых на экране ви-

деоконтрольного устройства. Гипотетически предполагают, что объект с линейным размером l_0 может быть обнаружен в телевизионном изображении, если его изображение на фотокатоде передающей трубки окажется соизмеримым с одним элементом разложения – шириной одной строки $\Delta_{\text{фк}}$.

Из практики известно, что объект в телевизионном изображении может быть обнаружен лишь в том случае, когда его изображение на фотокатоде перекрывает три-четыре строки.

Так, если размер проекции изображения на фотокатод 15×20 мм, разрешающая способность – 1200 линий, а оптика передающей трубки уменьшает изображение ОК в 10 раз, то размер разрешаемого элемента поверхности ОК составляет приблизительно 0,4 мм.

Световая характеристика. Световой характеристикой телевизионной системы называют зависимость яркости телевизионного изображения $B_{\text{вых}}$ от яркости объекта $B_{\text{вх}}$ телевизионного наблюдения: обычно

$$B_{\text{вых}} = KB_{\text{вх}}^{\gamma},$$

где K – коэффициент, γ – гамма-коэффициент телевизионного канала.

Опытным путем установлено, что для наилучшего распознавания деталей телевизионного изображения необходимо иметь γ – коэффициент, равный 1 ... 2. Подбор необходимого значения γ – коэффициента осуществляют, используя различные схемные решения (гамма-корректоры).

Инерционность. Инерционность телевизионных систем проявляется прежде всего в появлении хвостов у изображений дефектов движущихся ОК.

Можно выделить несколько причин возникновения инерционности в первичных преобразователях: конечная скорость образования зарядного или потенциального рельефа, конечная скорость считывания потенциального рельефа.

Передающие телевизионные трубки. Передающие телевизионные трубки по способу получения электрического изображения в них делят на две группы.

Первый способ, названный *фотоэмиссией*, заключается в том, что один из элементов трубки (мишень – полупрозрачный проводящий фотокатод) при фокусировке на него света, отраженного от ОК, испускает электроны. Такие трубки называются *супертриконами*.

Второй способ называется *фотопроводимостью*. Трубки, использующие явление фотопроводимости, называются *видиконами*. Видиконы в основном используются в промышленном телевидении и ниже коротко описывается принцип их работы.

В *видиконах* (рис. 4.22) используется внутренний фотоэффект, поэтому область спектральной чувствительности определяется границами его проявления 100 ... 2500 нм, а при охлаждении она может простирается до 4500 нм. В таких конструкциях сканирующий пучок медленных электронов фокусируется и отклоняется однородным полем. Мишень в видиконе представляет собой фотопроводящий (а не фотоэмиссионный) изолятор. Действие света сводится к генерации на сканируемой поверхности положительных зарядов, которые нейтрализуются сканирующим пучком.

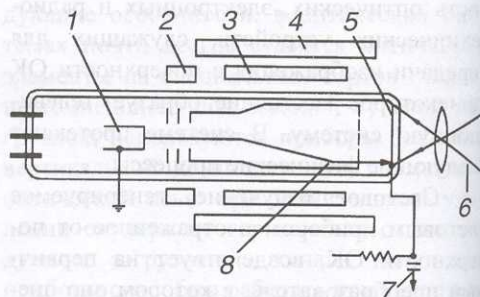


Рис. 4.22. Схема видикона:

- 1 – электронная пушка; 2 – корректирующая катушка; 3 – отклоняющее ярмо; 4 – фокусирующая катушка; 5 – фотопроводящая мишень; 6 – излучение от источника изображения; 7 – вывод видеосигнала; 8 – сканирующий пучок

Видиконы выпускаются с двумя основными типами мишеней: 1) с омическим контактом; 2) с сигнальной пластиной и запирающим контактом. При использовании запирающего контакта сигнал пропорционален интенсивности света; темновые токи и время "фотоответа" мишени чрезвычайно малы. При применении омического контакта выходной сигнал примерно на постоянное значение меньше, но пропорционален интенсивности света, и темновые токи оказываются того же порядка, что и видеосигнал. Кроме того, трубки с омическими контактами обладают сравнительно большей инерционностью, чем трубки с запирающим контактом.

Совершенствование конструкций видеокон с запирающим контактом идет по пути более тщательного выбора материалов фотопроводящей мишени, в качестве которых используются: оксид свинца (плумбиконы), сульфид кадмия (кадмиконы), фосфид галлия и другие, и применения кремниевых *p-n*-переходов. Оксид свинца широко применяется при производстве цветных передающих трубок. Благодаря высокой квантовой эффективности фотопроводников в видеокон обратный пучок электронов обычно не усиливается и сигнал снимается с мишени. Это позволяет избавиться от ряда ложных сигналов, таких, как ореолы. Однако шум усилителя, на который поступает сигнал с мишени, более чем в 10 раз превышает шум пучка. Поэтому в ряде видеокон применяются умножители для достижения более высокой разрешающей способности. Умножители могут использоваться того же типа, что и в суперортиконах.

В некоторых видеокон содержатся секции переноса изображения, тогда, бла-

годаря проводимости, индуцированной быстрыми электронами, ток мишени увеличивается в 10^3 раз.

Дальнейшее совершенствование видеокон в основном связано с разработкой мишени, способной осуществить режим ударной ионизации в сильных полях, при котором каждый фотоэлектрон, возбужденный светом, генерирует несколько вторичных электронов. В таких условиях можно будет регистрировать отдельные фотоны, применив электронное умножение пучка, что в итоге позволит работать при произвольно низких освещенностях.

Из-за высокой квантовой эффективности фотопроводниковой мишени видеокон по чувствительности сравним с суперортиконом. Гладкая гамма-характеристика видеокон дает прекрасный диапазон полутонов.

Твердотельные приборы. Приборы с зарядовой связью (ПЗС) являются разновидностью сверхбольших интегральных схем. Их появление позволило реализовать идею твердотельной передающей трубки (вместо вакуумной). ПЗС-приборы, чувствительные к внешнему световому потоку, в отличие от других типов ПЗС, получили название фоточувствительных ПЗС (ФПЗС). Они обладают жестким растром-привязкой элемента разложения изображения в фотоячейке, отсутствием дисторсии и других геометрических искажений, безынерционностью, высокой механической прочностью, низким питающим напряжением, взрывобезопасностью, потенциальной возможностью предварительной обработки информации внутри прибора (что реализовано в ряде зарубежных образцов), уступая вакуумным кадровым приемникам оптически-

го изображения в отношении разрешающей способности и подверженности воздействию различного рода радиации.

Много типов передающего оборудования было разработано на основе видикона для промышленных целей. Вообще имеются две основные конструкции: 1) очень компактная, недорогая установка для использования со стандартным приемным телевизионным устройством в качестве монитора и 2) сложная установка с большими возможностями, с мониторами, когда требования к работе более жесткие.

Телевидение можно использовать для визуального контроля амортизаторов автомобилей, если камеру смонтировать под автомобилем и наблюдать работу пружин. Наблюдение с помощью телевидения пламени печей помогает контролировать процесс горения. При контроле радиоактивных материалов телевидение обеспечивает близкое и надежное наблюдение. Телевидение может быть использовано с оптическим микроскопом, в частности, в металлургии.

В дополнение к преимуществу удобства наблюдения видикон может быть разработан чувствительным к ультрафиолетовому свету. Это позволяет проводить визуальный контроль материалов при освещении, невидимом для глаза, в спектральной области, где многие материалы хорошо поглощают излучение. Аналогично, видикон может быть сделан чувствительным к инфракрасному диапазону и рентгеновскому излучению.

При большом разнообразии промышленного телевизионного оборудования, которое можно приобрести, несложно выбрать подходящую установку для создания визуальной информационной связи. Можно также приобрести различные аксессуары, включая влагоустойчи-

вый кожух, различные вспомогательные мониторы и коммутирующие элементы.

Цифровые видеокамеры на основе твердотельной передающей трубки. В настоящее время при выполнении визуального контроля широко используются цифровые видеокамеры, в которых изображение записывается на стандартный жесткий диск, применяемый в портативных компьютерах. Помимо видео такая камера может записывать одиночные кадры в количестве, например, 3000, что эквивалентно 83 фотопленкам. Если сократить их количество до 1000, к каждому из них можно записать 10-секундный звуковой комментарий через встроенный микрофон, содержащий, например, сведения о результатах визуального контроля.

Камеру можно подсоединить к телевизору и просмотреть отснятый материал на его экране. Для монтажа записанного изображения можно использовать персональный компьютер. При работе в режиме "фото" изображение записывается на диск с разрешением примерно 700×500 пикселей. Качество изображения в режиме "фото" достаточно хорошее не только на экране монитора, но даже на экране телевизора. Но, конечно, по качеству изображения такая камера реальной конкуренции обычным фотокамерам оказать пока не может.

4.8. ФОТООБЪЕКТИВ И ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ СЪЕМКА ОБЪЕКТОВ КОНТРОЛЯ

Фотографическим объективом называется оптическая система, образующая действительное изображение предметов на светочувствительном элементе (фото- и кинопленка, электронные системы и т.п.). Объектив – это наиболее ответственная часть фото- и киноаппарата и от

его характеристики зависит качество изображения.

К основным оптическим характеристикам объектива относят фокусное расстояние f' , относительное отверстие D/f' , где D – диаметр действующего отверстия, и угловое поле 2ω , ограниченное двумя лучами, проходящими через отверстие диафрагмы объектива, и противоположными углами кадрового окна фотоаппарата. Важной характеристикой объектива является разрешающая способность.

Фокусное расстояние фотообъектива определяет масштаб изображения, светосилу и длину системы.

При съемке близко расположенных поверхностей ОК (на расстоянии z) масштаб изображения определяется линейным увеличением β , определенным отношением $\beta = f'/z$.

Соотношение величины фокусного расстояния f' и диагонали кадра ($2l_k$) определяет следующую классификацию фотообъективов:

- 1) нормальные – $f'/(2l_k)$ – в пределах 0,9 ... 1,5;
- 2) короткофокусные – меньше 0,9;
- 3) длиннофокусные – более 1,5.

Кроме объективов с постоянным фокусным расстоянием имеются объективы (панкреатические) с переменным непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием, например, в пределах $f' = 40 \dots 80$ мм.

Относительное отверстие D/f' определяет освещенность изображения и, следовательно, светосилу. Различают геометрическую $(D/f')^2$ и физическую – $\tau(D/f')^2$ светосилу, где τ – коэффициент пропускания объектива. Отношение $K = f'/D$ называют диафрагменным числом.

В фотографии принято следующее деление объективов по диафрагменному

числу: при $K < 1,4$ – сверхсветосильные; при $1,4 \leq K < 2,8$ – светосильные, при $2,8 \leq K < 5,6$ – нормальные; при $5,6 \leq K$ – несветосильные.

Глубиной резкости (глубиной изображенияемого пространства) называется способность объектива давать практически резкое изображение поверхностей, находящихся от него на различном расстоянии.

На практике при расчете глубины изображенияемого пространства для d принимают следующие средние значения: при фотосъемке – 0,05 мм; при киносъемке на 35 мм пленку – 0,05 мм; при киносъемке на узкую пленку – 0,015 мм.

Плоскость наводки на резкость располагается ближе к передней границе резкого изображенияемого пространства, чем к задней (примерно 1/3 зоны интереса).

В фотографической системе различают визуальную разрешающую способность в N_o , мм⁻¹ объектива, оцениваемую визуально по изображениям штриховых миш; разрешающую способность фотографического слоя N_c , мм⁻¹ и фотографическую способность N_{ϕ} , мм⁻¹ система – объектив-фотослой.

Для приближенных оценок указанных выше величин можно считать $N_o = 1500 D/f'$; для черно-белых фото- и киноплёнок N_c находится в пределах 70 ... 130 мм⁻¹ и

$$N_{\text{тм}} = \frac{N_o N_c}{N_o + N_c}.$$

Одним из важных факторов при съемке является размер фотографического негатива. Чем больше негатив, тем лучше увеличенное изображение. Важна и чувствительность пленки. Выбор пленки зависит от нескольких факторов, включая освещенность объекта контроля и размер окончательной фотографии.

Высококочувствительная пленка (большой номер) требует меньше света, на окончательной фотографии может просматриваться зерно. С увеличением этот эффект увеличивается. Низкокочувствительные пленки используются тогда, когда на фотографии нужно различать мелкие детали, но для их очувствления требуется больше света. Очень часто при фотосъемке ОК используют репродукционную съемку – т.е. съемку плоских объектов.

При репродукционных работах, как правило, требуется получить изображение с передачей мелких деталей оригинала. В связи с этим для репродуцирования применяют фотообъективы высокого качества с практически устраненными оптическими недостатками. При репродукционной съемке объект должен быть освещен равномерно. Равномерность освещения зависит от количества осветительных приборов, размеров ОК, угла падения светового потока на ОК и расстояния от источников света до ОК. ОК будет освещен практически равномерно, если разница освещенностей в разных его участках не превышает 6 %. Свет устанавливают визуально.

Это осуществляется следующим образом: в центре ОК вертикально помеща-

ют линейку и, перемещая светильники, добиваются одинаковой плотности теней, падающих от линейки. Небольшие ОК размером до 13×18 см обычно освещают двумя осветительными приборами. ОК большего формата освещают четырьмя и более источниками света.

ОК с глянцевой поверхностью нередко дают блики от осветителей. Для устранения этого недостатка необходимо следить за тем, чтобы угол падения света от осветительных приборов на ОК не превышал $25 \dots 30^\circ$. Если уменьшать этот угол, то увеличится и неравномерность освещения ОК из-за образования глубоких теней на его поверхности.

Слишком большая освещенность ОК может уменьшить контраст дефекта и затруднит его обнаружение на фотографии.

При фотографировании некоторых ОК, например, сварных труб, могут возникать нежелательные отражения от фотовспышки. Их можно устранить, передвинув фотовспышку так, чтобы зеркально отраженный свет не попадал в объектив. Один из эффективных методов устранения таких отражений состоит в использовании промежуточного белого отражателя света фотовспышки.

ОСНОВЫ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. ВИДЫ, ПОГРЕШНОСТИ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Отраслью науки, изучающей измерения, является метрология. Слово "метрология" образовано из двух греческих слов: "метрон" – мера и "логос" – учение, следовательно, метрология – учение о мерах.

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 специальных технических средств.

Единством измерений называется состояние измерений, при которых их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности известны с заданной вероятностью.

Процесс измерения характеризуется с одной стороны, восприятием и отображением физической величины, а с другой – нормированием, т.е. присвоением ей определенного числового значения (размера).

Численное значение x величины X представляет собой отношение измеряемой величины к величине N , принимаемой за единицу измерения:

$$X = xN .$$

Для проведения такой операции подлежащая измерению физическая величина должна быть однозначно определена.

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 $1/299792458$ секунды.

Рекомендуемые кратные и дольные единицы, образованные от метра, – км, см, мм, мкм, нм.

Распространенной единицей измерения угла является градус, который равен $1/360$ окружности. Градус обозначается "°" и делится на 60 минут, а минута – на 60 секунд. Минута и секунда обозначаются соответственно "' " и "" ". Эталонами при угловых измерениях служат многогранные призмы, по которым проверяют образцовые меры в виде разных многогранников, углы которых выполнены с высокой точностью.

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 $57^{\circ} 17' 44,8''$.

Измерения, по способу получения результатов, разделяют на прямые, косвенные, абсолютные и относительные (табл. 5.1).

При выборе измерительных средств пользуются так называемыми метрологическими показателями.

К основным показателям относятся: цена деления шкалы, диапазон измерений, предел допустимой погрешности средств измерений, допустимая погрешность измерительного средства, пределы измерения и нормальные условия.

При оценке годности деталей на производстве часто пользуются понятием контроля изделий. Под контролем понимается не определение действительного размера, а регистрация факта, что размер изделия не выходит за пределы допускаемых наибольшего и наименьшего размеров.

5.1. Виды измерений

Измерение	Определение
Прямое	Измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных
Косвенное	Измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям
Абсолютное	Измерение, основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант
Относительное	Измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную

5.2. Погрешности измерений и их составляющие

Погрешность	Определение	Причины возникновения погрешности
-------------	-------------	-----------------------------------

Составляющие погрешности измерения

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

Составляющие систематической погрешности измерения

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 Δx определяется формулой

$$\Delta x = x_{\text{изм}} - x,$$

где $x_{\text{изм}}$ — значение, полученное при измерении; x — истинное значение измеряемой величины.

Погрешности обычно подразделяют на несколько групп (табл. 5.2).

По условиям, определяющим точность результата, измерения подразделяют на три класса: эталонные и специальные измерения максимально возможной точности; контрольно-проверочные измерения, выполняемые государственными и заводскими измерительными лабораториями; технические измерения, выполняемые в процессе производства на машиностроительных предприятиях. При технических измерениях погрешность результата определяется характеристиками средств измерений.

5.3. Классификация средств измерений

Средство измерений	Определение	Примеры
Мера	Средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера	Плоскопараллельные концевые меры длины. Угловые меры
Измерительный прибор (измерительное устройство)	Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем	Измерительные линейки, рулетки, штангенциркули. Микрометрические приборы. Инструментальный микроскоп
Измерительный преобразователь (измерительное устройство)	Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем	Индуктивный преобразователь измерительного прибора
Измерительная установка	Совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенная в одном месте	Установка для проверки плоскопараллельных концевых мер длины
Измерительная система	Совокупность мер измерений, (мер, измерительных приборов и преобразователей), соединенных между собой каналами связи, предназначенными для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления	Трехкоординатная измерительная машина

5.4. Параметры средств измерений

Параметр	Определение
Номинальное значение меры	Значение величины, указанное на мере или приписанное ей
Действительное значение меры	Действительное значение величины, воспроизводимой мерой (получают при ее измерении путем исключения систематических погрешностей)
Отсчет	Число, отсчитанное по счетному устройству средства измерения, либо полученное счетом последовательных отметок или сигналов
Показания прибора (средства измерений)	Значение величины, определяемое по счетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины
Диапазон измерений	Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений
Предел измерений	Наибольшее или наименьшее значение диапазона измерений
Чувствительность измерительного прибора	<p>Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины.</p> <p>Абсолютная чувствительность $S = \Delta I / \Delta x$.</p> <p>Относительная чувствительность</p> $S_0 = \Delta I / \left(\frac{\Delta x}{x} \right),$ <p>где ΔI – изменение сигнала на выходе; x – измеряемая величина; Δx – изменение измеряемой величины</p>
Нормальные условия применения средства измерения	Условия применения средств измерений, при которых влияющие величины имеют нормальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. При нормальных условиях определяется основная погрешность средств измерения

5.5. Погрешности средств измерений

Погрешность	Определение
Δx абсолютная меры	Разность между номинальным значением меры x_n и истинным значением x воспроизводимой ею величины $\Delta x = x_n - x$
Δx_n абсолютная измерительного прибора	Разность между показанием измерительного прибора x_n и истинным значением x измеряемой величины $\Delta x_n = x_n - x$ Примечание. В связи с тем, что истинное значение величины остается неизвестным, на практике вместо него пользуются действительным значением
δ относительная меры (измерительного прибора)	Отношение абсолютной погрешности меры (измерительного прибора) к истинному (действительному) значению величины, воспроизводимой мерой (предпочтительно выражать в %) $\delta = \pm \frac{\Delta x}{x_n} 100$
$\Delta_{пр}$ 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. Обычно $\Delta_{пр}$ выражают в %: $\Delta_{пр} = \frac{\Delta x}{x_N} 100$
Основная средства измерений	Погрешность средства измерений, используемого в нормальных условиях
Дополнительная	Погрешность, вызванная отклонением от нормальных условий измерений
Предельно допустимая	Наибольшая (без учета знака) погрешность средства измерений, при которой оно может быть признано годным и допущено к применению

Измерения осуществляют с помощью технических средств, к которым относят меры, измерительные приборы, измерительные преобразователи, измерительные установки и измерительные системы. Их определения даны в табл. 5.3, их параметры в табл. 5.4, а погрешности в табл. 5.5.

5.2. ПОНЯТИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ЭТАЛОНАМ, ОБРАЗЦОВЫМ СРЕДСТВАМ ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЕ

Воспроизведение, хранение и передача размеров единиц осуществляется с помощью эталонов и образцовых средств измерений.

Эталон единицы (эталон) – средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений, выполненное по особой спецификации и официально утвержденное в установленном порядке в качестве эталона.

Поверочная схема – утвержденный в установленном порядке документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размера единицы от эталона или исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений.

Образцовое средство измерений – это мера, измерительный прибор или измерительный преобразователь, служащие для поверки по ним других средств измерений и утвержденные в качестве образцовых.

Рабочее средство измерений – средство измерений, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

Поверка – определение метрологическим органом погрешностей средств измерений и установление его пригодности к применению.

Оформление результатов поверки средства измерений – составление официального документа о результатах поверки средства измерений и (или) его клеймения.

Метрологическая аттестация средств измерений (аттестация) – это исследование средства измерений, выполняемое метрологическим органом для определения метрологических свойств этого средства измерений, и выдача документа с указанием полученных данных.

Калибровка меры – поверка меры (набора мер) посредством совокупных измерений.

Градуировка средства 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 погрешностей средств измерений до значений, соответствующих техническим требованиям.

Измерение размеров. При измерении линейных размеров в зависимости от задачи измерения за начало отсчета отклонений принимают или номинальные размеры или прилегающие поверхности (контуры), или средние. При контроле размеров, отклонений формы и расположения используют прилегающие.

Номинальный размер – размер, который служит началом отсчета отклонения и относительно которого определяются предельные размеры. Номинальные размеры указывают на чертежах деталей и сборочных единиц.

Отклонение – алгебраическая разность между размером (действительным, предельным и т.п.) и соответствующим номинальным размером.

Прилегающие поверхности и контуры – это поверхности и контуры, имеющие форму номинальных (и заданных чертежом), касательные к реальной поверхности, лежащие вне материала детали и имеющие наименьшее значение максимального отклонения от реальной поверхности.

Измерение размера – это или измерение размера прилегающего замкнутого контура (например, для цилиндрических поверхностей – диаметр прилегающего цилиндра) или измерение максимального расстояния между прилегающими поверхностями (контурами).

Измерение отклонений формы – это измерение отклонений реальных поверхностей (контуров) от прилегающих.

Измерение отклонений расположения – это измерение отклонений расположения прилегающих поверхностей (контуров) или их осей относительно номинальных положений или отклонений взаимного расположения.

Средние поверхности (контуры) определяют как поверхности и контуры,

имеющие форму номинальных и пересекающие реальный профиль так, что разность сумм квадратов положительных и отрицательных отклонений минимальна.

Нормальные условия для линейных измерений в пределах от 1 до 500 мм и измерений углов с длиной меньшей стороны до 500 мм:

– температура окружающей среды 20 °С;

– атмосферное давление 101324,72 Па (760 мм рт.ст.);

– относительная влажность окружающего воздуха 58 % (нормальное парциальное давление водяных паров 1333,22 Па);

– ускорение свободного падения 9,8 м/с²;

– направление линии измерения линейных размеров до 160 мм наружных поверхностей – вертикальное, в остальных случаях – горизонтальное;

– положение плоскости измерения углов – горизонтальное;

– относительная скорость движения внешней среды равна нулю;

– значения внешних сил равны нулю.

В соответствии с принципом *компарирования Аббе* измеряемый отрезок на объекте и сравниваемый отрезок на измерительном инструменте следует располагать соосно. Это требование на практике не всегда соблюдается.

5.3. СРЕДСТВА ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Плоскопараллельные концевые меры длины – это мера, изготовленная в виде бруска прямоугольного сечения с двумя плоскими взаимно-параллельными измерительными поверхностями, обладающими свойством притираться к измерительным поверхностям других концевых мер или плоских вспомогательных пластин. С помощью концевых мер длины воспроизводят единицы длины, поверяют и градуируют измерительные инструменты и

приборы, поверяют калибры и контркалибры, настраивают оборудование, а также выполняют точные измерения, разметочные работы. Бруски имеют разные размеры от 0,1 до 1000 мм и комплектуются в наборы, состав которых определяет ГОСТ 9038–90 (в ред. 1997 г.).

Штриховые меры длины. К штриховым мерам длины относятся брусковые (ГОСТ 12069–90), измерительные линейки (ГОСТ 427–75 (в ред. 1993 г.)) и рулетки (ГОСТ 7502–98).

Брусковые меры применяют в качестве образцовых средств измерений.

Измерительные линейки изготавливают с одной или двумя шкалами с верхними пределами измерений 150, 300, 500 и 1000 мм ценой деления 0,5 мм.

Измерительные металлические рулетки могут быть длиной от 1 до 100 м.

Штангенциркули. К этим измерительным приборам относят измерительные инструменты с линейным нониусом: штангенциркули (ГОСТ 166–89 (в ред. 1993 г.)), штангенрейсмасы (ГОСТ 164–90), штангенглубиномеры (ГОСТ 162–90).

Штангенциркули со значением отсчета по нониусу 0,05 и 0,1 мм предназначены для измерения наружных и внутренних размеров до 2000 мм.

Штангенрейсмасы предназначены для измерения высот и разметочных работ. Их изготавливают со значением отсчета по нониусу 0,05 и 0,1 мм и пределами измерений от 0...250 до 1500...2500 мм.

Штангенглубиномеры предназначены для измерения выступов, глубин отверстий и пазов.

Погрешность показаний штангенциркули нормируют в пределах величины отсчета.

Микрометрические приборы. К приборам данной группы относят: микрометры с ценой деления 0,01 мм, рычажные микрометры, настольные микрометры, глубиномеры микрометрические и нутромеры микрометрические.

Микрометрические нутромеры предназначены для измерения внутренних размеров 50 ... 6000 мм; диапазон измерений от 50 ... 75 до 2500 ... 6000 мм. Например, нутромер НМ 2500 имеет пределы измерений 600 ... 2500 мм, цену деления 0,01 мм и предел допускаемой погрешности на максимальном размере $\pm 0,04$ мм.

Рычажно-зубчатые приборы. К приборам этого типа относят: головки измерительные, скобы с отсчетным устройством, глубиномеры, нутромеры, толщиномеры, стенкомеры.

Индикаторные нутромеры с ценой деления 0,01 мм применяют для измерения внутренних размеров 6 ... 100 мм.

Толщиномеры настольные (ТС) имеют цену деления 0,01 мм и пределы измерения 0 ... 10 мм, а ручные (ТР) цену деления 0,1 мм и пределы измерения 0 ... 50 мм. У толщиномеров с ценой деления 0,01 мм предельная погрешность измерения $\pm 0,02$ мм.

Стенкомеры, например, моделей С-2 и С-10А имеют цену деления 0,01 мм, а модели С-10Б, С-50 и СМТ-90 – цену деления 0,1 мм.

Цифры у буквенных обозначений моделей показывают наибольший предел измерения.

Оптические и оптико-механические приборы бывают контактные и бесконтактные, проекционные, интерференционные, лазерные и основанные на других физических принципах. Простым и удобным средством измерения являются накладные (контактные) измерительные лупы (ЛИ-3-10^x, ЛИ-4-10^x и др.). Они содержат стеклянную плоскую шкалу (обычно длиной 15 мм, цена деления 0,1 мм) и лупу с увеличением 10^x.

Измерительные микроскопы (в том числе портативные накладные) содержат набор измерительных шкал, расположенных в плоскости изображения микрообъектива и позволяющих контролировать линейные размеры деталей, радиусы, углы

и т.п. Точность измерения с помощью окулярного винтового микрометра типа МОВ-15^x достигает 0,5 ... 1 мкм при увеличениях 10^x ... 20^x. Поле зрения микроскопов обычно 1 ... 20 мм.

Многие измерительные микроскопы оборудованы устройствами прецизионного перемещения изделий в предметной плоскости микрообъектива с возможностью отсчета координат. Это расширяет диапазон измерений при сохранении высокой точности (диапазон перемещений составляет 50 ... 200 мм, погрешность отсчета – до 1 мкм). Многие модели современных измерительных микроскопов снабжаются устройствами измерения вертикального перемещения микрообъектива, т.е. обеспечивается трехмерное измерение объектов.

Оптико-электронные приборы для контроля геометрии изделий принято классифицировать на фотокомпенсационные, фотоследящие и фотоимпульсные. Кроме того, иногда в отдельную группу выделяют телевизионные, лазерные и растровые системы.

Для решения различных задач создано множество специальных оптических датчиков и методов измерения, служащих для анализа размеров и формы.

Электронные измерительные приборы и системы. В современной промышленности такие простые цифровые измерительные приборы как штангенциркули, микрометры, вертикальные (горизонтальные) высотомерные и угломерные приборы и длиннопроходные щупы имеют широкие области применения. К цифровым измерительным приборам через промежуточное устройство могут быть подключены печатающее устройство – для протоколирования результатов или вычислительная машина – для оценки и дальнейшей обработки.

Многокоординатные измерительные системы. Разработка универсальных электронных зондов для измерений в трехмерных координатах в сочетании с ЭВМ дала возможность объединить обработку результатов измерений с управле-

нием системы. Эти системы предлагаются во многих модификациях, отличающихся по разным показателям, начиная от внешнего исполнения, размеров, точности и кончая отделкой и степенью автоматизации, а также производительностью. Современные управляемые ЭВМ многокоординатные системы позволяют определять в кратчайшее время отклонения от нормы размеров, формы и положения очень сложных изделий. С этой целью используется ряд измерительных приборов; одни – для определения отклонений формы, другие – для определения отклонений положения.

Трехкоординатные измерительные системы состоят из станины, на которой размещены средства измерения и направляющие для движущихся вдоль трех пространственных координат частей прибора, и системы зондирования, служащей для получения значений измеряемых величин. При конструировании стремятся найти компромисс между принципом компарирования Аббе, высокой жесткостью кон-

струкции и доступностью пространства измерения.

В координатных измерительных системах для определения значений координат в направлениях осей применяют метод накопления измеренных длин. Средства измерения представлены в табл. 5.6.

Калибры, шаблоны, щупы. Калибром называется бесшкальный измерительный инструмент для контроля размеров, формы и взаимного расположения частей изделия. Калибры не имеют отсчетных устройств для определения размеров, с их помощью можно только установить, выполнен ли действительный размер детали в пределах допуска или нет. Для проверки сложных профилей служат профильные калибры, называемые шаблонами.

Радиусный шаблон – инструмент для контроля профильных радиусов кривизны выпуклых и вогнутых поверхностей изделий. Представляет собой стальную пластину толщиной 0,5 ... 1 мм с вогнутым или выпуклым закруглением на конце (рис. 5.1). Радиус закругления 1 ... 25 мм.

5.6. Измерительные системы координатных измерительных приборов

Средство измерения длины	Принцип зондирования	Разрешение, мкм
Зубчатая рейка	Электромеханический	10
Микрометрический винт	Преобразователь угла поворота	0,1
Штриховая шкала	Оптический с накоплением	0,1
Измерение длины волны света (лазер)	Электронный	0,01

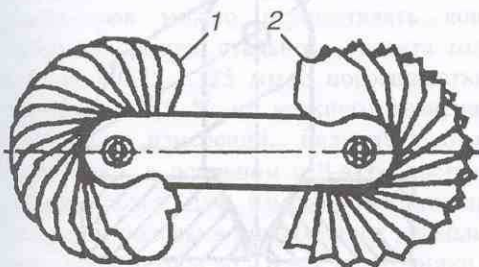


Рис. 5.1. Набор радиусных шаблонов:

1 – выпуклых; 2 – вогнутых

Резьбовой шаблон – инструмент для определения шага и угла профиля резьбы изделий – стальная пластинка толщиной 0,5 ... 1 мм с зубцами, выполненными по осевому профилю резьбы (рис. 5.2)

Для контроля конструктивных элементов формы и размеров кромок, зазоров собранных под сварку соединений, а также размеров выполненных сварных швов используют специальные шаблоны, имеющие вырезы под определенный шов, размер которого иногда указан (выбит) на шаблоне (рис. 5.3).

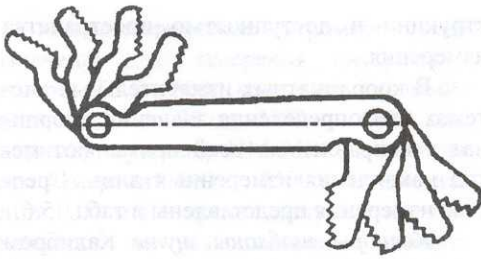


Рис. 5.2. Набор резьбовых шаблонов

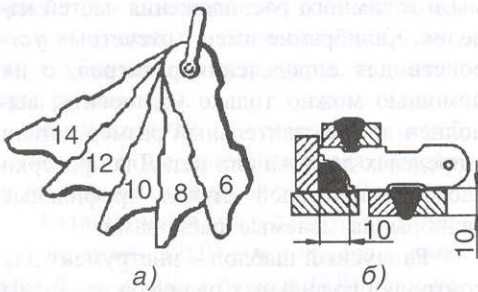


Рис. 5.3. Набор шаблонов (а) для контроля размеров швов и пример использования шаблонов (б)

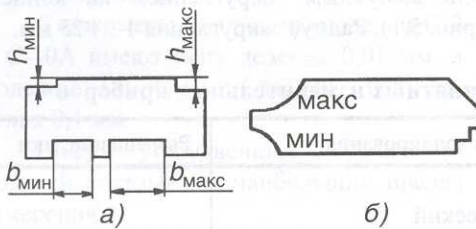


Рис. 5.4. Предельные шаблоны:

а — для контроля стыковых швов; б — для контроля угловых швов; h — высота усиления; b — ширина шва

Часто для указанных выше целей используют предельные шаблоны (рис. 5.4) с наибольшими (проходными) и наименьшими (непроходными) контрольными вырезами и щупы-калибры, применяемые для контроля зазоров между плоскостями (рис. 5.5), имеющими вид мерной пластины определенной толщины. Толщина одной пластины — от 0,02 до 1 мм. Щупы длиной 100 мм поставляются наборами, длиной 200 мм — отдельными пластинами.

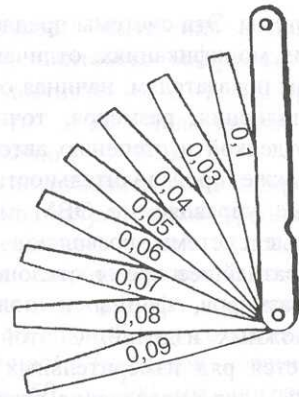


Рис. 5.5. Щупы измерительные в обойме

Средства для измерения углов. Для контроля углов применяют такие средства как: угольники, угловые меры, калибры, механические и оптические делительные головки, гониометры, синусные линейки и др.

Угловые меры, угольники и калибры — это жесткие контрольные инструменты, имеющие определенные значения углов. Угловые меры в основном применяют для поверки и градуировки различных средств измерений углов, но они могут применяться и непосредственно для измерения углов и деталей изделий. Калибры — шаблоны для контроля углов скоса кромок, углов разделки кромок широко используются при контроле соединений, собранных под сварку (рис. 5.6).

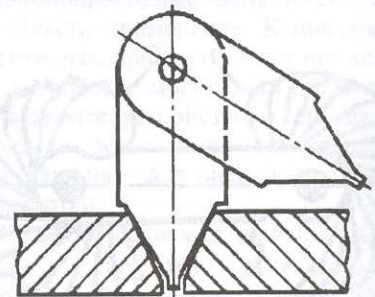


Рис. 5.6. Проверка угла скоса и зазора между кромками стыкового соединения

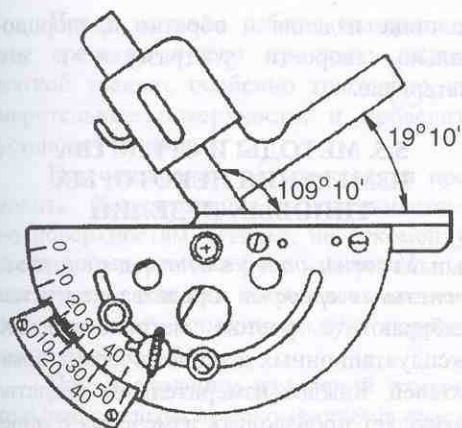


Рис. 5.7. Нониусный угломер

Для измерения углов изделий очень часто пользуются универсальными угломерами, например, нониусными (рис. 5.7), оптическими, индикаторными, соответственно с размерами величин отсчета 2', 3' и 5'.

5.4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Радиационные устройства. Рентгеновские и радионуклидные измерители широко используются для бесконтактного автоматического контроля толщины листового проката в производстве путем регистрации прошедшего через материал излучения. Выбирая необходимые ускоряющие напряжения и ток рентгеновской трубки, с помощью рентгеновских толщиномеров можно осуществлять контроль, например, стального проката толщиной 0,002 ... 25 мм с погрешностью измерения 0,5 % от верхнего значения диапазона измерений. Радионуклидные источники, в основном с β -активностью, используются для измерения толщины стальной полосы в диапазоне от нескольких микрометров до 0,8 мм, а источники с γ -активностью – для контроля горячего проката из стали толщиной 3,5 ... 40 мм. При контроле толщины алюминиевого

проката верхнее значение диапазона увеличивается, а при контроле проката меди и сплавов на ее основе уменьшается.

Системы, основанные на регистрации прошедшего через ОК излучения, можно условно разделить на две группы:

- 1) прямого измерения параметров одного пучка излучения – абсолютный метод;
- 2) непрерывного сравнения параметров двух пучков излучения – компенсационный метод.

В системах прямого измерения стабилизация напряжения и тока трубки осуществляется с помощью микропроцессоров. В качестве детекторов используются ионизационные камеры и сцинтилляционные счетчики. Детектор с преусилителем как правило помещают в термостат для снижения влияния температуры окружающей среды.

Измерители, работающие по методу сравнения двух потоков излучения, в зависимости от числа применяемых источников и приемников, могут быть трех видов: с одним источником излучения и двумя приемниками; с двумя источниками и одним приемником; с двумя источниками и двумя приемниками.

Калибровка толщиномеров в достаточно широком диапазоне значений толщины проката (0,2 ... 12 мм) осуществляется путем разделения этого диапазона на отдельно калибруемые поддиапазоны. Скорость прокатки (контроля) горячекатаного листа в настоящее время может достигать значений 16 м/с, холоднокатаного – до 30 м/с.

Магнитные устройства. Магнитные толщиномеры предназначены для контроля толщины защитных покрытий и изделий из ферромагнитных материалов.

Большую группу таких приборов составляют толщиномеры механического действия, работа которых основана на измерении силы отрыва или притяжения постоянных магнитов и электромагнитов к контролируемому объекту. Эти приборы имеют диапазон измерений примерно

0 ... 500 мкм и основную погрешность 5 ... 10 % от измеряемой толщины.

Для контроля толщины немагнитных покрытий на ферромагнитной основе широкое распространение получили индукционные толщиномеры. Их действие основано на определении изменения магнитного сопротивления (проводимости) магнитной цепи, состоящей из ферромагнитной основы (деталь), преобразователя прибора и немагнитного зазора между ними, который является объектом измерений. Эти толщиномеры при диапазоне измерений 0 ... 1000 мкм имеют основную погрешность около 5 % от измеряемой толщины.

Вихретоковые устройства. Вихретоковые приборы основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля.

Вихретоковые толщиномеры диэлектрических покрытий на электропроводящих основаниях имеют диапазон измерений от 0,02 ... 0,22 мм до 10 ... 50 мм с погрешностью 5 мкм. Толщиномеры электропроводящих покрытий на электропроводящем основании при диапазоне измерений 0 ... 1,0 мм имеют погрешности 5 мкм, а толщиномеры проводящего слоя (до 10 мм) в диапазоне измерений 0,8 ... 5 мм имеют погрешность 2 % от измеряемой толщины.

Ультразвуковые устройства. Эхоимпульсные ультразвуковые толщиномеры являются в настоящее время одной из наиболее массовых разновидностей приборов контроля толщины и выпускаются в мире десятками тысяч в год. Они отличаются широким диапазоном (от десятков микронов до полуметра) и высокой точностью измерений (погрешность менее 1 %). Приборы основаны на измерении времени пробега ультразвуковых импульсов между поверхностями измеряемого объекта, которое прямо пропорционально

толщине изделия и обратно пропорционально скорости ультразвука в его материале.

5.5. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

Условия, определяющие выбор измерительных средств. Средства измерения выбирают с учетом метрологических, эксплуатационных и экономических показателей. Каждое измерительное средство позволяет производить измерения с определенной предельной погрешностью (точностью), 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;
- выравнять температуру измерительного средства и измеряемого изделия при нормальной температуре 20 °С;
- производить измерения несколько раз и принимать за действительный размер среднее значение;
- выполнять рекомендации по обращению с измерительными средствами.

Так, при получении точного измерительного средства рекомендуется проверить наличие документа о поверке (паспорта) и не просрочена ли его поверка по установленному 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 антикоррозионным составом и уложить в футляры. Наносить удары по измерительному инструменту и ронять его строго запрещается.

Измерение больших длин и диаметров. Прямые измерения больших длин и диаметров осуществляют с помощью скоб, микрометров, штангенциркулей, нутромеров, масштабных линеек, рулеток различных типов и конструкций.

Предельная погрешность измерения линейками и рулетками включает следующие составляющие.

1. Погрешность δ , которая равна допустимому отклонению длины шкалы. Для рулеток 3-го класса точности при номинальных длинах шкал 1 и 5 м допустимые отклонения длины шкал составляют соответственно около 0,4 мм и 2 мм.

2. Погрешность отсчета по шкале $\delta_2 \approx 0,3$ мм.

3. Температурная погрешность.

4. Погрешность δ_3 от смещения Δ линейки (рулетки) от линии измерения.

5. Погрешность от непостоянства усилия натяжения ленты.

6. 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.

Далее кратко рассмотрены такие косвенные методы измерения больших диаметров и длин, как измерения от дополнительных баз, опоясывания, с использованием накладных приборов 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. 5.8 $D = d + l_1 + l_2$, а предельная погрешность измерения $\delta D = \sqrt{\delta d^2 + \delta l_1^2 + \delta l_2^2}$; при измерении наружного диаметра по рис. 5.9:

$$D = 2 \left(l_1 + \frac{d}{2} - l_2 \right), \quad \delta D \approx \sqrt{\delta l_1^2 - \delta l_2^2}.$$

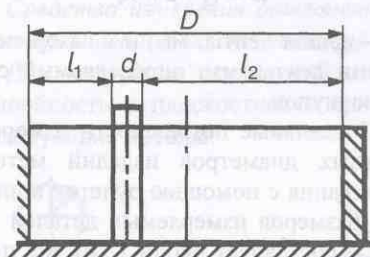


Рис. 5.8. Типовая схема измерения от дополнительных баз внутренних диаметров

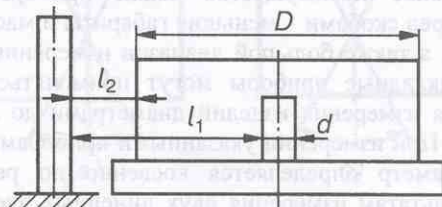


Рис. 5.9. Типовая схема измерения от дополнительных баз наружных диаметров

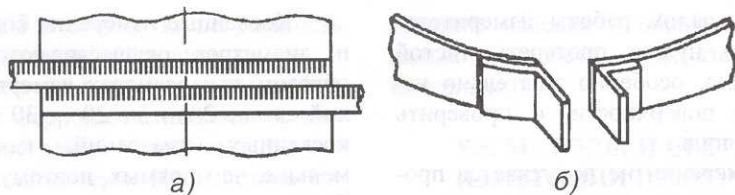


Рис. 5.10. Определение наружного диаметра:
а – рулеткой; б – металлической лентой с угольником

Метод опоясывания. Сущность этого метода заключается в определении наружного диаметра D изделия по результатам измерения длины окружности l рулеткой (рис. 5.10, а) или металлической лентой (рис. 5.10, б) с угольниками натяжения на концах.

При измерении рулеткой

$$D = \frac{l}{\pi} - t,$$

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.

Предельные погрешности измерения наружных диаметров изделий методом опоясывания с помощью рулеток в интервалах размеров 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 большой диапазон измерения. Накладные приборы могут применяться для измерения изделий диаметрами 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. 5.11). При измерении штангенциркулем диаметр

$$D = \frac{L^2}{4H} + H,$$

отклонение диаметра

$$\Delta D = \frac{\Delta L}{2H},$$

где ΔL – отклонение измеряемой величины.

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. Ниже кратко описаны некоторые из средств контроля отклонений формы и расположения поверхностей.

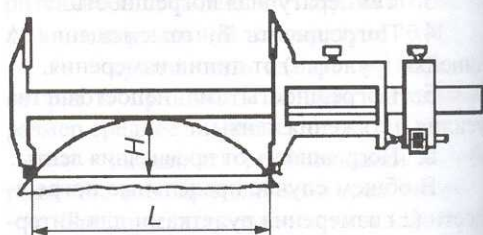


Рис. 5.11. Метод измерения диаметра по хорде и высоте сегмента с помощью штангенциркуля

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, индикаторных скоб, нутромеров и т.п. могут быть оценены овальность и огранка деталей с четным числом граней.

5.7. Выбор числа плоскостей измерений

l , мм	До 50			Св. 50 до 200			Св. 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

Примечание: l – длина измеряемой цилиндрической поверхности; l/d – соотношение длины и диаметра измеряемой поверхности; N – число плоскостей измерения.

При этом первое и последнее сечения 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° .

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. 5.12) или с помощью накладного прибора седлообразного типа.

Кругломеры представляют собой приборы, основанные на методе прецизионного вращения измерительного наконечника относительно неподвижной детали или детали относительно неподвижного наконечника. Кругломерами можно

При измерении отклонений от круглости стоит задача выбора плоскости измерения и количества направлений измерения в каждой плоскости.

Если она не задана, то измерения производят в нескольких плоскостях. Число плоскостей для задач контроля отклонений от круглости может определяться в соответствии с табл. 5.7.

контролировать детали с 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:

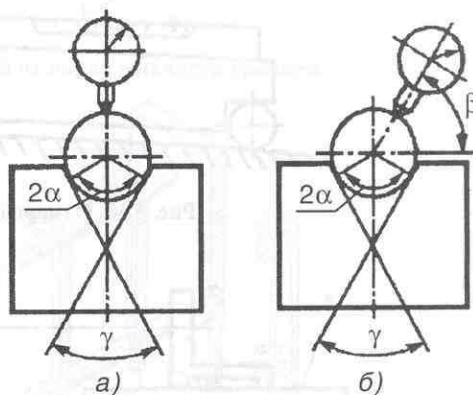


Рис. 5.12. Схема измерения огранки с нечетным числом граней:

a – симметричное устройство;
 b – несимметричное устройство

1) механические (измерение с помощью поверочных линейек, плит, натянутой струны, карусельного плоскомера);

2) гидростатические (измерение методом свободно налитой жидкости, сообщающихся сосудов и с помощью уровня);

3) оптико-механические (автоколлимационные и коллимационные методы, метод визирования);

4) оптические (измерение плоскими стеклянными пластинами и интерферометрами).

Измерения отклонений от прямолинейности поверочными линейками как способом "на просвет", так 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 ука-

занная выше погрешность составляет 2 ... 50 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. 5.13). Подъем или опускание передней опоры вызывает соответствующее смещение пузырька уровня, определяемое по шкале ампулы. Предельные погрешности измерения отклонений от прямолинейности с использованием уровней находятся в пределах 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. 5.14).

Предельные погрешности измерения отклонений от прямолинейности при использовании этих оптических приборов для длин измеряемых поверхностей от 400 до 1000 мм лежат в пределах от 1,0 до 10 мкм.

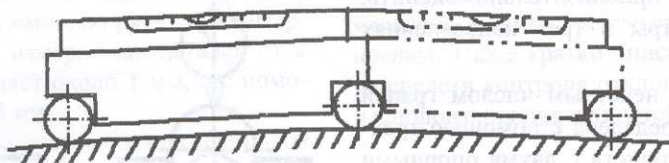


Рис. 5.13. Измерения с помощью уровня

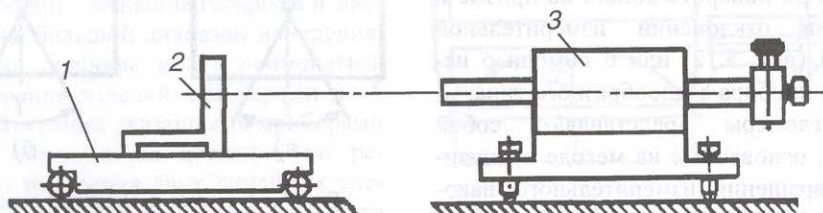


Рис. 5.14. Измерение отклонений от прямолинейности:
1 — мостик; 2 — зеркало; 3 — автоколлиматор

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 на универсальном штативе, уровне, специальных измерительных приспособлений, автоколлиматора и зеркала, коллиматора и визирной трубы и т.п.

При измерении уровнем

$$\Delta x(\Delta y) = \frac{nc}{1000}L,$$

для схем по рис. 5.15 и

$$\Delta x(\Delta y) = \frac{nc}{1000}l - \text{ по рис. 5.16,}$$

где n – разность показаний уровня в числах деления шкалы; c – цена 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 (рис. 5.17), измерительной головки, закрепленной на универсальном штативе, и угольника (рис. 5.18) и других специальных приспособлений.

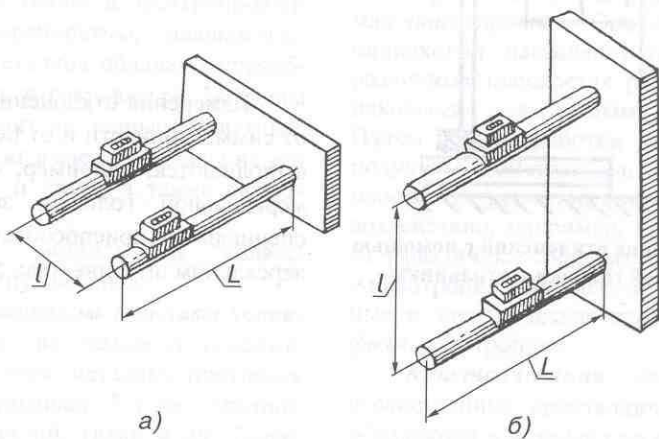


Рис. 5.15. Измерение отклонений от параллельности уровнем

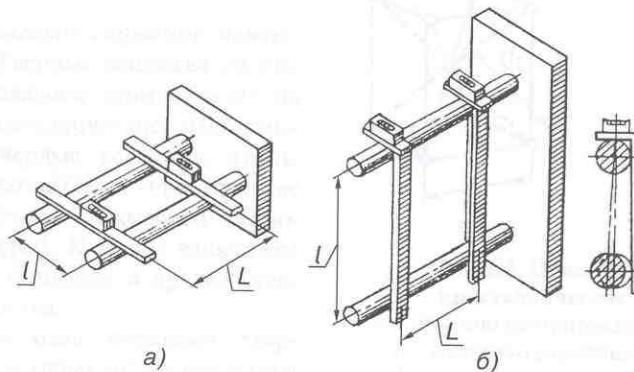


Рис. 5.16. Измерение отклонений от параллельности уровнем

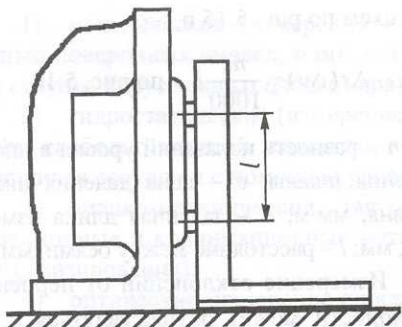


Рис. 5.17. Измерение отклонений с помощью угольника и плоскопараллельных концевых мер длины или шупов

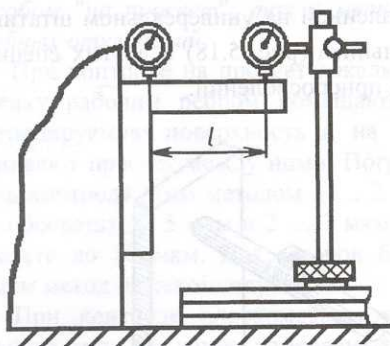


Рис. 5.18. Измерение отклонений с помощью измерительной головки и угольника

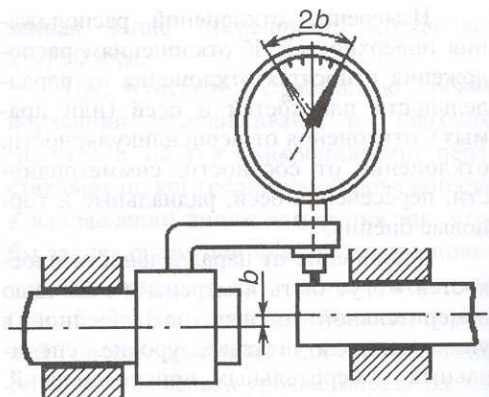


Рис. 5.19. Измерение отклонений от соосности с помощью измерительной головки

Измерения отклонений от соосности, от симметричности и от пересечения осей выполняются, например, с помощью измерительной головки, закрепленной в специальном приспособлении или в универсальном штативе (рис. 5.19).

ОСНОВЫ МЕТАЛЛОВЕДЕНИЯ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЪЕКТАМ КОНТРОЛЯ И РАБОЧЕЙ СРЕДЕ

6.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ, СВОЙСТВАХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

При контроле объектов, выполненных из металлов, необходимо знать их химический состав, а также учитывать условия эксплуатации, воздействие силовых и других факторов, влияющих на работоспособность и надежность объектов.

Черные и цветные металлы. Металлами называются химически простые вещества, отличающиеся хорошим блеском, высокими тепло- и электропроводностью, непрозрачностью, плавкостью; некоторые из металлов обладают способностью коваться и свариваться. Металлы и их сплавы делят на черные и цветные. К *черным* относят железо и сплавы на его основе – чугун и сталь, а также ферросплавы.

Остальные металлы и сплавы составляют группу *цветных*.

Цветные металлы и сплавы условно подразделяют на легкие и тяжелые. К *легким* относятся металлы, плотность которых не превышает 5 г/см^3 : магний, бериллий, алюминий, титан и др. *Тяжелыми* являются металлы с плотностью более 5 г/см^3 .

Кристаллическое строение металлов и сплавов. Твердые вещества по взаимному расположению атомов делят на аморфные и кристаллические. *Аморфными* называют твердые вещества, атомы которых располагаются в пространстве хаотично (отсутствие трехмерной периодичности структуры). К таким веществам относят стекло, канифоль и другие стеклообразные вещества.

Кристаллическими называют твердые вещества, в которых почти все атомы (ионы, молекулы) находятся в простран-

стве в строго определенном порядке, образуя трехмерную атомно-кристаллическую решетку. Все металлы являются кристаллическими веществами. В металлах, используемых в промышленности, наиболее распространены следующие кристаллические решетки (рис. 6.1): объемно центрированная кубическая (ОЦК) (рис. 6.1, а) и гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рис. 6.1, б).

Одной из важнейших особенностей металлов является неоднородность механических свойств в различных направлениях кристаллической решетки, называемая *анизотропией*. Она объясняется неодинаковой насыщенностью атомами в различных плоскостях решетки и неодинаковыми межатомными расстояниями. Путем термообработки металлов можно получить свойства, одинаковые во всех плоскостях решетки, а при механическом воздействии, например, при прокате листа – различные свойства вдоль и поперек. Анизотропия позволяет изменять магнитные и электрические свойства, *полиморфизм*, аллотропию.

Кристаллизация металлов. Пространственные кристаллические решетки образуются в металле при переходе его из

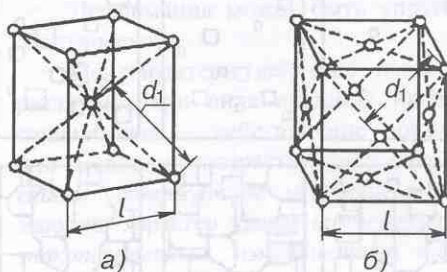


Рис. 6.1. Пространственные кристаллические решетки:

а – объемно центрированная кубическая;

б – гранецентрированная кубическая;

l – период кристаллической решетки;

d_1 – наименьшее расстояние между атомами

жидкого состояния в твердое. Этот процесс называется *кристаллизацией*. Преращения, связанные с кристаллизацией, в значительной степени определяют свойства металлов. Впервые процессы кристаллизации были изучены русским ученым Д.К. Черновым. Сущность кристаллизации состоит в следующем: в жидком металле атомы непрерывно движутся, по мере понижения температуры движение замедляется, атомы сближаются и группируются в кристаллы, которые называют центрами кристаллизации. Далее к центрам присоединяются вновь образующиеся кристаллы. Одновременно появляются новые центры. Таким образом, кристаллизация состоит из двух стадий: образования центров кристаллизации и роста кристаллов вокруг этих центров.

Кристалл растет лишь в том направлении, где он соприкасается с жидкостью.

Схематический процесс кристаллизации показан на рис. 6.2. Кристаллы, пока их окружает жидкость, растут свободно и могут иметь правильную геометрическую форму. Однако при столкновении растущих кристаллов правильная их форма нарушается, так как на контактируемых участках рост граней прекращается. В результате растущие кристаллы, имеющие сначала геометрически правильную фор-

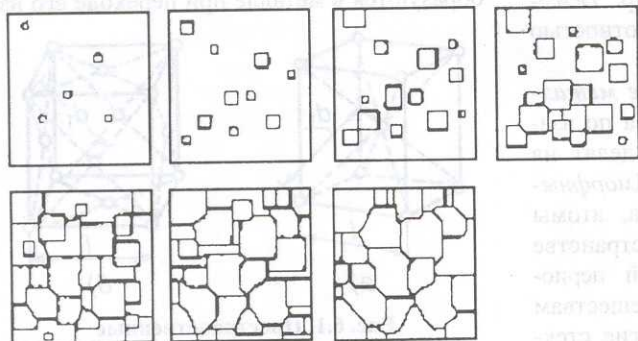


Рис. 6.2. Схема процесса кристаллизации

му, после затвердевания получают неправильную внешнюю форму и называются зернами или кристаллитами.

Если в расплавленный металл ввести частицы какого-либо элемента, то они, являясь добавочными центрами кристаллизации, способствуют образованию мелкого зерна. Использование примесей для получения мелкого зерна называется *модифицированием*. Кристаллы, образующиеся при затвердевании металла могут иметь различную форму в зависимости от скорости охлаждения и количества примесей. Обычно в направлении отвода тепла кристалл растет быстрее, чем в другом направлении. В результате образуется древовидный кристалл-дендрит (рис. 6.3). Разрушение зерен при ковке, штамповке связано с разрушением оболочки зерна, препятствующей его росту. Для предотвращения роста зерен при такой обработке осуществляют термообработку металла, например отжиг или нормализацию.

Вторичная кристаллизация (аллотропия). В некоторых металлах пространственные кристаллические решетки не всегда являются постоянными. Они могут иметь две и более различных форм. Это изменение обусловлено изменением температуры, давления и наличием постоянных примесей.

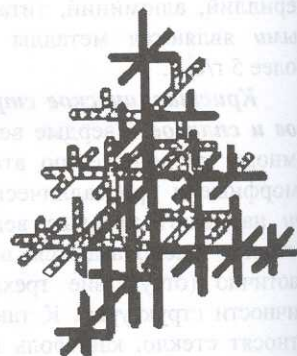


Рис. 6.3. Схема дендрита

Такую способность одного и того же металла иметь различные формы кристаллической решетки называют *аллотропией* (полиморфизмом). Аллотропические превращения происходят в железе, олове, титане, кобальте и других металлах. Медь, алюминий не претерпевают аллотропических превращений. Сущность аллотропии состоит в том, что при изменении температур в твердом металле возникают новые центры кристаллизации. Это приводит к образованию новой решетки, формирование которой происходит с поглощением тепла при нагревании и выделением тепла при охлаждении.

Физические свойства металлов.

К физическим свойствам металлов относят цвет, плотность, температуру плавления, теплопроводность, тепловое расширение, теплоемкость, электропроводность, магнитные свойства.

Химические свойства металлов.

Химические свойства — это способность металлов и сплавов противостоять окислению и разрушению под действием внешней среды, влаги, воздуха, кислот и т.д. Химическое разрушение под действием указанных факторов называют *коррозией* металлов.

Механические свойства металлов.

Механические свойства определяют способность металлов сопротивляться воздействию сил (нагрузок). Они зависят от химического состава металлов, их структуры, способа технологической обработки и других факторов. Зная механические свойства, можно судить о поведении металла при обработке и в процессе работы оборудования. Изменение размеров и формы деталей под действием приложенных сил называется *деформацией*. Деформация может быть вызвана воздействием внешних сил, приложенных к телу, или внутренних сил, возникающих при физико-механических процессах, протекающих в самом теле. В теле возникают нормальные и касательные напряжения. Различают временные (внешние) напряжения и внутренние.

Временные напряжения возникают под действием внешней нагрузки и исчезают после ее снятия. *Внутренние* напряжения возникают и уравниваются в пределах данного тела без воздействия внешних сил.

Образование внутренних напряжений связано с неравномерным распределением деформаций по объему тела. Например, при быстром нагреве и охлаждении металла происходит неоднородное расширение (сжатие) внешних и внутренних слоев металла. Такие напряжения называют *тепловыми*. Кроме того, внутренние напряжения могут возникать вследствие фазовых превращений при термической обработке. Эти напряжения называются *фазовыми*.

Внутренние напряжения классифицируют по следующему принципу:

- напряжения I рода, уравнивающиеся в объеме всего тела, так называемые макронапряжения;
- напряжения II рода, уравнивающиеся в объеме одного зерна (кристаллита) или нескольких блоков, так называемые микронапряжения;
- напряжения III рода, уравнивающиеся в объемах порядка размеров кристаллической ячейки — субмикроскопические.

Внутренние напряжения оказывают большое влияние на свойства металлов и превращения, протекающие в них.

Деформация может быть упругой и пластической.

По характеру действия на металл различают три вида внешних нагрузок: *статические* — действующие постоянно или медленно возрастающие; *динамические* — действующие мгновенно, принимающие характер удара; *циклические*, или *знакопеременные*, изменяющиеся или по величине, или по направлению, или одновременно и по величине, и по направлению.

К основным механическим свойствам металлов относят прочность, пластичность, твердость, упругость, ударную вязкость. *Прочность* — способность ме-

талла сопротивляться разрушению или появлению остаточных деформаций под действием сил. Большое значение имеет удельная прочность, ее находят отношением предела прочности к плотности металла. Для стали предел прочности выше, чем для алюминия, а удельная прочность ниже. *Пластичность* – способность металла к остаточной деформации без разрушения. *Твердость* – это способность металла сопротивляться поверхностной деформации под действием более твердого тела. *Упругость* – способность металла возвращаться к первоначальной форме после прекращения действия сил. *Ударная вязкость* – способность металла сопротивляться разрушению под действием динамической нагрузки. Кроме указанных механических свойств можно назвать усталость (выносливость), ползучесть и др. Для установления характеристик механических свойств производят их испытания.

Разрушение металлов. Под разрушением понимают процесс зарождения и развития в металле трещин, приводящий к разделению его на части.

Разрушение принято классифицировать с учетом величины пластической деформации, предшествовавшей разрушению, а также с учетом характера распространения трещины в металле.

Если разрушению предшествовала значительная пластическая деформация, разрушение называют *вязким*, если же пластическая деформация составляла менее 1...2%, разрушение считают *хрупким*.

С точки зрения микроструктуры существуют два вида разрушения – *транскристаллитное* и *интеркристаллитное*. При транскристаллитном разрушении трещина распространяется по телу зерна, а при интеркристаллитном она проходит по границам зерен.

У большинства материалов, в частности у металлов, разрушение не является ни вполне хрупким, ни вполне вязким, и действительный характер разрушения определяется рядом факторов, в том числе типом кристаллической структуры мате-

риала, его чистотой, термической и деформационной траекторией, условиями эксплуатации и характеристиками окружающей среды.

Под упруго-хрупким поведением материала понимается идеализированный случай, когда материал ведет себя упруго, вплоть до потери сплошности.

Поведение идеально хрупкого материала регулируется правилом последовательного соединения (гипотезой "слабого" звена): разрушение любого элемента приводит к разрушению всей детали. В качестве элемента может быть принят также бесконечно малый объем.

При хрупком разрушении величина пластической зоны в устье трещины мала. Скорость распространения хрупкой трещины весьма велика. Для стали скорость роста трещины достигает 2500 м/с. Поэтому нередко хрупкое разрушение называют "внезапным", или "катастрофическим", разрушением. Хрупкое разрушение чаще всего происходит по определенным кристаллографическим плоскостям внутри зерна, т.е. имеет место транскристаллитное разрушение. Однако при определенных условиях (низкие температуры, большое количество дисперсных фаз по границам зерен или обогащение этих границ примесями, ослабляющими связи) металлы и сплавы могут хрупко разрушаться по границам зерен (транскристаллитное разрушение).

Транскристаллитное разрушение может реализовываться *сколом* и *срезом* (сдвигом), как правило, отличающимися видом поверхностей разрушения. При срезе – поверхность разрушения, как правило, серая и волокнистая, при сколе – светлая кристаллическая.

Если растягивающие силы, сконцентрированные у вершины трещины, превосходят напряжение когезии (сцепление частиц), разрыв межатомных связей происходит перпендикулярно плоскости разрушения, то происходит разрушение сколом (рис. 6.4, а).

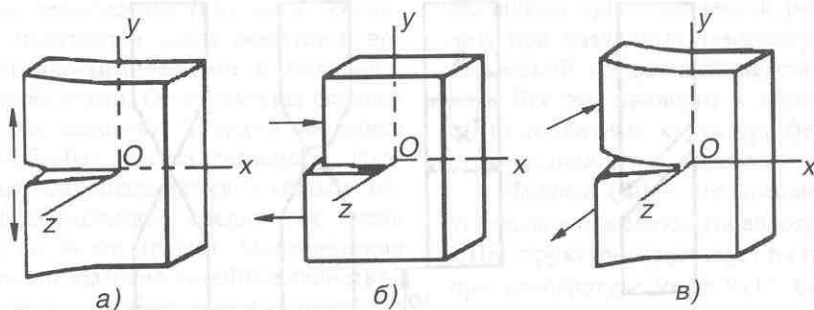


Рис. 6.4. Основные типы перемещений поверхностей трещины:
a – нормальный отрыв; *б* – поперечный сдвиг; *в* – продольный сдвиг

Если же разрыв тех же межатомных связей происходит под действием силы, приложенной параллельно плоскости разрушения, то это – разрушение срезом (рис. 6.4, б, в).

В кристаллических материалах по определенным кристаллографическим плоскостям имеет место разрушение как сколом, так и срезом (сдвигом, скольжением), и характер протекания обоих этих процессов зависит главным образом от кристаллической структуры материала.

Все концентраторы напряжений способствуют хрупкому разрушению. Хрупкие разрушения обычно связывают с наличием дефектов. Они могут быть внутренними, поверхностными и служат источниками концентрации напряжений. Дефекты могут быть в виде пор, шлаковых включений, горячих и холодных трещин, микротрещин, непроваров и т.п. Необходимо их контролировать и принимать соответствующие меры.

С увеличением остроты и размеров дефектов склонность к хрупкому разрушению возрастает. Чем выше скорость деформации, тем больше склонность металла к хрупкому разрушению. Чем больше размеры изделия, тем больше вероятность хрупкого разрушения (масштабный фактор). Хрупкое разрушение материала происходит при высоких и

низких (ниже предела текучести материала), а в ряде случаев – без приложений нагрузки. Последние имеют место при наличии высоких остаточных напряжений в зоне острых дефектов. Понижение температуры способствует переходу от вязкого разрушения к хрупкому. Это явление получило название хладоломкости.

При вязком разрушении величина пластической зоны, идущей впереди распространяющейся трещины, велика, а сама трещина защемляется у своей вершины. Вязкому разрушению соответствуют обычно высокие значения поглощенной энергии, т.е. большая работа распространения трещины.

Вязкое разрушение может развиваться различными способами, каждому из которых соответствуют характерные картины всей поверхности разрушения или некоторой ее части. Наиболее важные типы вязкого разрушения схематически представлены на рис. 6.5.

Технологические свойства металлов. Детали машин и конструкций кроме физико-технических и механических свойств должны обладать технологическими свойствами. К ним относят литейные свойства, характеризуемые жидкотекучестью металла и усадкой, свариваемость, ковкость и др.

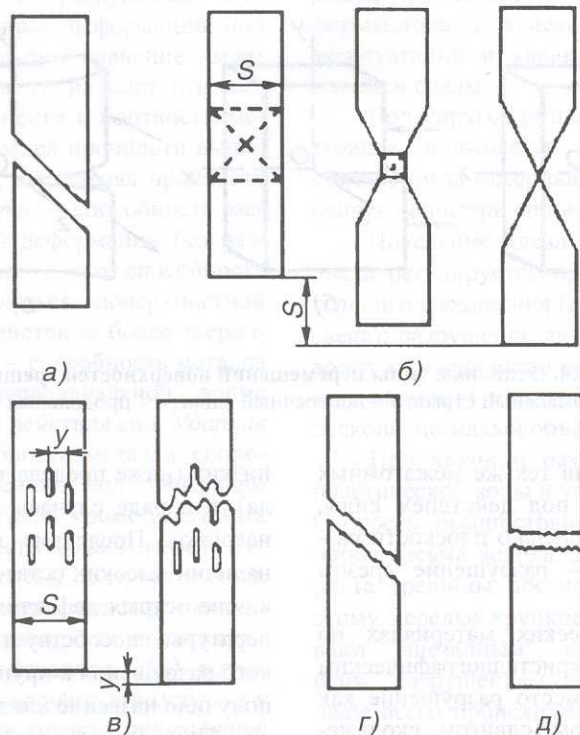


Рис. 6.5. Основные виды вязкого разрушения:

а – чистый сдвиг; б – сужение до острия; в – волокнистое разрушение;
 г – разрушение срезом; д – разрушение по нормали

6.2. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ СПЛАВОВ

Применение чистых металлов в промышленности крайне ограничено. Они не всегда экономичны, часто не отвечают требуемым свойствам. В чистых металлах не всегда сочетаются одновременно несколько свойств, например твердость с пластичностью. Сплавы в отличие от чистых металлов можно получить почти с любыми заданными свойствами. *Сплавы* – кристаллические вещества, полученные соединением металлов с металлами или неметаллами. Например, чугун и сталь – это сплавы железа с углеродом, латунь – сплав меди с цинком. Составляющие части сплавов называются компонентами. Сплавы могут быть двух-, трех- и четырехкомпонентными. При изготовлении изде-

лий применяют свыше 10 тыс. сплавов.

Свойства сплавов отличаются от свойств компонентов, входящих в их состав. Важное значение имеют также характер соединения компонентов и процессы, связанные с образованием сплава. При затвердевании в сплавах получают различные по строению и свойствам структуры: механические смеси, твердые растворы и химические соединения.

В сплаве, образующем *механическую смесь*, находятся кристаллы всех соединившихся компонентов. В сплаве, представляющем собой *твердый раствор*, сохраняется одна кристаллическая решетка – компонента-растворителя, а атомы растворенного компонента или находятся в решетке растворителя, или замещают атомы растворителя, или внедряются в решетку между атомами растворителя.

В сплаве, являющемся *химическим соединением*, получается новая решетка с новыми физико-химическими и механическими свойствами. От структуры сплавов зависят их свойства. Твердые растворы хорошо обрабатываются давлением, закаляются, сопротивляются ударным нагрузкам. Химические соединения очень тверды, но более хрупки. Механические смеси имеют высокие литейные свойства.

Фазовые превращения в сплавах. По сравнению с чистыми металлами сплавы имеют более сложное строение. Процессы их кристаллизации сложнее и существенно отличаются от процессов кристаллизации чистых металлов. Основное отличие состоит в том, что сплавы кристаллизуются не при одной строго определенной температуре, как чистые металлы, а имеют две температуры кристаллизации: ее начала и конца кристаллизации. В интервале между этими температурами имеются две фазы, т.е. однородные части системы: жидкий сплав и образовавшиеся кристаллы. Практически изучить температуры кристаллизации каждого из сплавов невозможно и нецелесообразно. Для этой цели созданы особые диаграммы состояния сплавов, в которых графически отображены температуры кристаллизации сплавов, их характер и состояние при изменении состава в зависимости от температуры. Диаграммы позволяют правильно подходить к выбору сплава при технологической обработке и характеризуют его физические и многие механические свойства.

Структурные превращения железоуглеродистых сплавов. Железоуглеродистые сплавы сложны по химическому составу. Кроме основного компонента – углерода – они содержат много примесей. Но особого влияния на температуры кристаллизации и структурные составляющие эти примеси не оказывают. Поэтому диаграмму железоуглеродистых сплавов следует рассматривать как диаграмму двухкомпонентных сплавов железо – углерод. Сложность этой диаграммы объясняется

различием кристаллической решетки железа при различных температурах и модификаций соединений железа с углеродом. Все это приводит к образованию в стали различных структур: феррита, аустенита, цементита, перлита.

Феррит (Ф) – это твердый раствор углерода в α -железе. Эта аллотропическая ОЦК структура существует в стали только при температуре ниже 911° . Содержание углерода в феррите незначительно: минимальное при комнатной температуре – 0,006 %, максимальное при температуре 727°C – 0,03 %. Эта самая мягкая структура стали, ее твердость 80 ... 100 НВ. Имеет небольшие прочность, твердость и высокую пластичность; магнитен.

Аустенит (А) – это твердый раствор углерода в γ -железе, ГЦК хорошо растворяет углерод, содержание которого в стали составляет 2,14 % при температуре 1147°C . Твердость аустенита невысокая (170 ... 220 НВ), но достаточно высокими являются его прочность, пластичность, стойкость против коррозии. Структура немагнитная. Имеет меньший удельный объем, чем феррит.

Цементит (Ц) или карбид железа (Fe_3C) – химическое соединение железа с углеродом, максимальное содержание углерода 6,67 %. Это самая твердая структура стали (700 ... 800 НВ). Цементит прочен, но очень хрупок; магнитен; имеет сложную кристаллическую решетку.

Перлит (П) – это механическая смесь феррита с цементитом. Различают два вида перлита: пластинчатый (цементит в виде пластинок) и зернистый (цементит в виде зерен). Зернистый перлит тверже и прочнее пластинчатого и занимает промежуточное место между ферритом и цементитом (200 ... 220 НВ). Перлит содержит 0,8 % углерода, обладает высокими прочностью и упругостью, пластичность его не очень высокая.

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов. В диаграмме рассматриваются превращения в сплавах с содер-

жанием углерода до 6,67 % (более 6,67 % углерода в железе не растворяется). По горизонтали откладывается содержание углерода от 0 до 6,67 % (рис. 6.6).

Сплавы, содержащие углерод от 0 до 2,14 %, – это стали, а сплавы с содержанием углерода от 2,14 до 6,67 % – это чугуны. Превращение из жидкого состояния (ж.с.) в твердое таких сплавов, т.е. их первичная кристаллизация, начинается на линии ликвидуса ACD . При этом сплавы, содержащие до 4,3 % углерода, кристаллизуются по AC с выделением аустенита (A), а сплавы, содержащие более 4,3 % углерода, – по CD с выделением цемента первичного ($Ц$). $AECF$ является линией солидуса. Ниже этой линии все сплавы железа с углеродом находятся в твердом состоянии (конец кристаллизации).

После затвердевания в рассматриваемых сплавах образуются различные структуры. Точка C (4,3 % углерода) представляет эвтектическую точку. Она соответствует температуре 1147 °С, при которой затвердевает такой сплав. При этом одновременно выделяются из жидкого сплава кристаллы аустенита и первичного цемента, образуя эвтектическую

смесь, – *ледебурит* ($Л$). Его структура представляет собой равномерную смесь кристаллов аустенита с первичным цементитом ($A + Ц$), обладающую высокой твердостью (около 800 НВ) и хрупкостью.

Цементит называется первичным, потому что он выделяется непосредственно из жидкого сплава. Чугуны, содержащие менее 4,3 % углерода, называют *доэвтектическими*. Их кристаллизация начинается при температурах, лежащих на линии AC , с выделением аустенита, и заканчивается при температурах, лежащих на линии EC . При дальнейшем понижении температуры растворимость углерода уменьшается, и аустенит не может удерживать в себе цементит и начинает его выделять. Такой цементит получил название вторичного ($Ц_2$). Поэтому в доэвтектических чугунах получают три структуры: $Л + A + Ц_2$. При дальнейшем понижении температуры из аустенита продолжает выделяться цементит. Когда его останется 0,8 %, при температуре 727 °С аустенит переходит в перлит. Таким образом, в доэвтектическом чугуне при очень медленном охлаждении образуется структура $Л + П + Ц_2$.

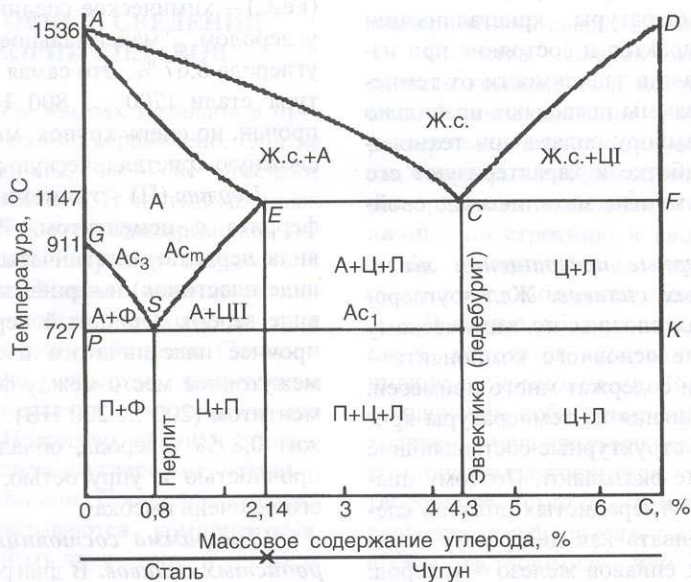


Рис. 6.6. Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов

Чугуны, содержащие более 4,3 % углерода, называют *заэвтектоидными*. В промышленности применяют доэвтектоидные и эвтектоидные чугуны, а заэвтектоидные вследствие высокой хрупкости не используются.

Главная роль в диаграмме состояния железоуглеродистых сплавов отводится ее левой части (левее 2,14 % С – сталям, так как на превращениях, происходящих в них, основана термообработка. Рассмотрим эти превращения. В результате затвердевания, которое соответствует линии *AE*, образуется аустенит (А); при понижении температуры этот аустенит претерпевает вторичную кристаллизацию, связанную с изменением кристаллической решетки – с переходом γ -железа в α -железо, с изменением растворимости углерода в этих модификациях, с выделением из аустенита феррита и цементита ЦП.

В точке *S*, при температуре 727 °С аустенит полностью распадается, образуется смесь феррита с цементитом ЦП, называемая перлитом – П. Эту сталь называют *эвтектоидной*. Сталь, содержащую менее 0,8 % углерода, называют *доэвтектоидной*, а сталь с содержанием более 0,8 % углерода – *заэвтектоидной*. Переход чистого железа из модификации γ -железа в α -железо происходит при температуре 911 °С. На диаграмме это соответствует точке *G*. Распад аустенита в доэвтектоидных сталях начинается при температурах, лежащих на линии *GS*, с выделением феррита (Ф). Поэтому при дальнейшем понижении температуры содержание углерода в оставшемся аустените возрастает. Когда оно составит 0,8 % (при температуре 727 °С), аустенит полностью перейдет в перлит. Таким образом, в доэвтектоидной стали при полном медленном охлаждении получается структура П + Ф. В заэвтектоидной стали начало распада аустенита соответствует линии *SE*. При понижении температуры аустенит, пересыщенный углеродом, выделяется в виде цементита вторичного (ЦП). Когда в аустените останется 0,8 % углерода, он при температуре 727 °С перейдет в

перлит. Следовательно, в заэвтектоидной стали при полном медленном охлаждении получается структура П + ЦП.

Линия *GS* называется линией верхних критических точек или линией начала распада аустенита (при охлаждении). Эта линия *GS* обозначается также A_{c3} – при нагревании, A_{r3} – при охлаждении. Линия *PSK* (температура 727 °С) – линия нижних критических точек или линия перлитных превращений (при охлаждении). Она обозначается A_{c1} – при нагревании, A_{r1} – при охлаждении. Линия *ES* обозначается A_{cm} .

Диаграмма состояния железоуглеродистых сплавов позволяет установить температурные режимы кристаллизации сталей и белых чугунов, режимы горячей обработки давлением (ковки, прокатки, штамповки), режимы термообработки и т.д.

При очень медленном охлаждении кристаллизация может идти таким образом, что углерод выделяется в виде графита (графитизация). Железоуглеродистые сплавы с содержанием углерода в форме графита называются серыми чугунами.

6.3. ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫЕ СПЛАВЫ

К железоуглеродистым сплавам относят чугун и сталь. Чугун – самый дешевый машиностроительный материал, обладающий хорошими литейными свойствами. Кроме того, он является исходным продуктом для получения стали.

Основные сведения о производстве чугуна. Доменный процесс, продукты доменной плавки. Сырьем для плавки чугуна является железная руда. Эта горная порода, содержащая железо в количестве необходимом для переработки. Важнейшими железными рудами являются: магнитный железняк, красный железняк, бурый железняк, шпатовый железняк и железистые кварциты.

В рудах кроме оксидов железа находится пустая порода – кремнезем, глина,

сера, фосфор и другие примеси. Их частично нужно удалить еще до плавки. Поэтому руду подвергают предварительному обогащению с целью увеличить содержание в ней железа.

Продуктом, необходимым при плавке чугуна, являются флюсы, главным образом известняк CaCO_3 , они служат для окончательного удаления пустой породы из руды в процессе плавки в доменной печи.

Важный материал для получения чугуна – топливо. Топливом является кокс. Его получают из специальных коксующихся углей путем нагрева до температуры 1000°C без доступа воздуха.

Чугун выплавляется в доменных печах. Процессы, происходящие в доменной печи, являющейся печью шахтного типа, можно разделить на следующие периоды: восстановление железа из его оксидов; превращение железа в чугун; шлакообразование. Эти процессы протекают одновременно.

Наряду с процессами восстановления железа происходят реакции восстановления и других элементов шихты: кремния, марганца, фосфора.

В результате восстановления указанных элементов в доменной печи получается сложный сплав железа с углеродом, марганцем, серой и фосфором. Пустая порода, зола, часть серы, кокса и примеси руды соединяются с флюсами, образуя шлак.

Чугуны. Состав, свойства, область применения. Чугун состоит из железа (до 92 %), углерода (от 2,14 до 5 %) и примесей: кремния (до 4,3 %), марганца (до 2 %), серы (до 0,07 %), фосфора (до 1,2 %). Ниже показано влияние примесей чугуна на его свойства.

Углерод в чугуне бывает в двух видах: в свободном состоянии – в виде графита; в химическом соединении с железом Fe_3C – в виде цементита. Если углерод в чугуне находится полностью или частично в виде графита, то чугун имеет в изломе серый цвет и называется серым.

Если углерод в чугуне находится в виде цементита, то чугун имеет в изломе белый цвет и называется белым. Кремний способствует получению серого чугуна, а марганец – белого. Серый и белый чугуны резко отличаются по свойствам. Белые чугуны очень твердые и хрупкие, плохо обрабатываются инструментом, в основном идут на переплавку в сталь и называются *передельными чугунами*. Часть белого чугуна используется для получения ковкого чугуна. Серые чугуны обладают хорошими литейными свойствами, мягкие, хорошо обрабатываются и сопротивляются износу, они называются *литейными чугунами*.

Легированные чугуны содержат наряду с обычными примесями легирующие элементы (хром, никель, титан и др.), которые резко улучшают механические свойства, увеличивают сопротивление коррозии. Легированные чугуны могут заменять стальное литье.

Специальные чугуны или ферросплавы обладают повышенным содержанием кремния или марганца. К ним относят ферросилиций, ферромарганец и др. Эти чугуны применяют для раскисления стали, т.е. для изъятия из стали вредной примеси – кислорода.

Ковкие чугуны (КЧ) значительно пластичнее серых.

Высокопрочные чугуны (ВЧ) отличаются высокими прочностью и пластичностью. Применяются для изготовления ответственных изделий, заменяют сталь. Высокопрочный чугун применяют для производства коленчатых валов, зубчатых колес и подобных деталей.

Способы получения стали из чугуна. Сталеплавильные печи. Процессы варки. В отличие от чугуна сталь содержит меньше углерода и вредных примесей. Поэтому процесс получения стали состоит в удалении этих элементов. Основные способы получения стали: кислородно-конвертерный, мартеновский и в электропечах.

Конвертерный способ. В кислородном конвертере при продувке жидкого чугуна кислородом можно останавливать процесс на заданном содержании углерода и получать сталь самых различных марок. Качество получаемой стали аналогично качеству мартеновской стали; серу и фосфор удается выводить наиболее полно; этому способствуют горячий ход плавки и возможность конвертера вмещать достаточное количество флюсов.

Недостатком кислородно-конвертерного способа получения стали является сооружение сложных и дорогостоящих пылеочистительных установок, так как в процессе плавки образуется много пыли. Строительство кислородного конвертера требует значительных затрат. Не уступая по качеству мартеновскому способу получения стали, конвертерный способ значительно превосходит его по производительности.

В конвертерах выплавляют легированную сталь, сталь для производства автомобильного листа, инструмента и др.

Мартеновский способ. Сталь в мартеновских печах выплавляется из передельного чугуна (твердого или жидкого), металлического лома, иногда вместо него применяют железную руду, вводят флюсы, главным образом известняк. Топливом служат газы: доменный, коксовый, природный, а также мазут.

Мартеновский процесс делится на три этапа: плавление, кипение и раскисление. Во время плавления окисляются кремний, марганец и фосфор за счет кислорода в FeO. Образующиеся оксиды SiO₂, MnO₂, P₂O₅, соединяясь с известняком, образуют шлак. Сера в виде FeS тоже соединяется с CaO и переходит в шлак. Для ускорения процесса расплавления и окисления примесей в печь подают через водоохлаждаемые фурмы кислород, благодаря чему резко сокращаются процесс плавки и расход топлива и руды. Во время кипения окисляется углерод. При этом осуществляют химический контроль для определения количества углерода в стали.

Когда достигнуто необходимое содержание углерода, серы и фосфора, сталь раскисляют ферросплавами или алюминием.

По характеру раскисления различается сталь кипящая, спокойная и полуспокойная. Кипящая сталь менее плотная. В ней имеются газовые включения. Ее применяют для изготовления неотчетственных деталей. В спокойной стали газовых включений нет, она плотнее, ее используют для производства коленчатых валов, рессор и т. д. Полуспокойная сталь содержит небольшое количество газов, из нее изготавливают проволоку, мостовые конструкции.

Плавка в электрических печах. Такая плавка является важнейшим способом получения стали высокого качества для производства ответственных деталей машин и инструментов. Она имеет ряд преимуществ перед мартеновской и кислородно-конвертерной. Электроды быстро нагревается до заданной температуры — 2000 °С. Легко регулируется тепловой процесс. Изменяя количество электроэнергии, можно регулировать температуру в печи. Кроме того, можно создать окислительную или восстановительную атмосферу или даже вакуум. В электропечи легче легировать сталь, можно более полно удалять серу и фосфор, получать более раскисленную сталь.

Электропечи бывают дуговые и индукционные. Наиболее распространены дуговые. Они питаются переменным трехфазным током и имеют три вертикально расположенных электрода, между ними и металлом возникает электрическая дуга. Печь имеет съемный свод, рабочее окно и выпускные отверстия со сливным желобом. Материалами для получения стали в электропечи служат металлический лом, легированные отходы и небольшая часть передельного чугуна для науглероживания стали. Для образования шлака применяют известняк, свежееобожженную известь. После окончания завалки электроды опускают вниз и включают ток, возникает электрическая дуга с тем-

пературой 3500 °С, начинается расплавление материалов. В процессе плавания окисляются кремний, марганец и фосфор; их оксиды соединяются с флюсами и переходят в шлак, который сливают. После этого производят науглероживание и раскисление. Затем удаляют вредные примеси, для десульфурации (удаления серы) в печь снова вводят флюсы. В конце плавки производят окончательное раскисление, сталь доводят до нужного состава.

Разливка стали. Это очень важная операция, в большой степени определяющая качество готового изделия. Сталь из печи выпускают в разливочный ковш, а затем направляют на разливку. Существуют два способа разливки: в изложницы и на установках непрерывной разливки стали (УНРС).

Изложницы – это чугунные формы. Разливка в изложницы может происходить сверху или снизу. При разливке сверху сталь заливают в каждую изложницу отдельно и получают слитки большого сечения. При разливке снизу (сифонно) одновременно заливают несколько изложниц и получают слитки малого сечения. При разливке стали сверху оборудование несложное, но производительность низкая. Поверхность слитка из-за брызг металла не всегда качественная. При разливке стали снизу поверхность слитка чистая, но в слиток попадают неметаллические включения, велики отходы металла в литниках.

Разливка в изложницы имеет ряд недостатков. Качество полученных слитков невысокое и их химический состав неодинаков; в верхней части слитка получаются усадочные раковины. В гл. 7 рассмотрены внутренние и поверхностные дефекты стали, характерные для металла, выплавленного в мартеновских, электродуговых печах и кислородных конвертерах, и разлитого в изложницы. Крупные слитки следует предварительно обжимать на черновых прокатных станах, а затем на сортовых станах получают требуемый профиль.

Непрерывная разливка стали на установках (УНРС) является наиболее прогрессивной и производительной.

Слитки непрерывной разливки стали по качеству значительно превосходят слитки, полученные в изложницах: они плотнее, мелкозернисты, усадочная раковина может быть только в самом конце разливки, качество поверхности хорошее, слитки не нужно обжимать.

Классификация стали по составу, назначению, и качеству. Согласно действующим нормативам классификации, сталь по составу делят на углеродистую и легированную.

Углеродистой сталью называют сплав железа с углеродом, в котором углерода до 2,14 %, и примесями кремния, марганца, серы и фосфора. Главным компонентом, определяющим свойства этой стали, является углерод. Массовое содержание элементов в стали (%): до 99 Fe; до 2,14 C; 0,15 ... 0,35 Si; 0,2 ... 0,8 Mn; до 0,07 S; до 0,07 P.

Углерод находится в стали главным образом в виде цементита, который повышает твердость, упругость, прочность, но уменьшает пластичность и сопротивление ударным нагрузкам, ухудшает обрабатываемость. Кремний и марганец в небольшом количестве особого влияния на сталь не оказывают. Сера и фосфор – вредные примеси. Сера находится в стали в виде FeS, она вызывает красноломкость, т.е. хрупкость при высоких температурах (при ковке, прокате), снижает усталостную прочность, уменьшает коррозионную стойкость. Сера улучшает обрабатываемость, и поэтому на станках-автоматах обрабатывается сталь с содержанием серы до 0,2 % и фосфора до 0,15 %. Фосфор, содержание которого составляет до 0,07 %, придает стали высокую хрупкость при обычных температурах, т.е. вызывает ее хладноломкость. Особенно отрицательно фосфор влияет на сталь при высоком содержании углерода. Вредной примесью в стали является и кислород.

Углеродистые стали. Свойства, маркировка, применение. Углеродистую сталь классифицируют по назначению и качеству. По назначению она бывает конструкционной и инструментальной.

Конструкционной углеродистой называют сталь, содержащую не более 0,6 % углерода (в виде исключения – до 0,85 %). По качеству конструкционную углеродистую сталь делят на две группы: обыкновенного качества и качественную. Сталь обыкновенного качества предназначена для изготовления неотчетливых строительных конструкций, крепежных деталей, листов, труб, заклепок, рельсов, валов, фланцев, кулачков и т.д. Качественную конструкционную сталь используют для изготовления деталей, требующих высоких пластичности и сопротивления удару: зубчатых колес, винтов, деталей, подлежащих цементации и т.д. В качественной стали меньше серы и фосфора, чем в обыкновенной. Сталь обыкновенного качества выплавляется в кислородных конверторах и мартенах и делится на три группы: А, Б, В. Сталь группы А поставляется по механическим свойствам, группы Б – по химическому составу, группы В – по химическому составу и механическим свойствам. Их механические свойства определяются пределом прочности и пластичности.

Качественная конструкционная углеродистая сталь поставляется по химическому составу и механическим свойствам. Она выплавляется в кислородных конвертерах, мартеновских и электропечах. Допускается содержание серы в этой стали до 0,04 %, фосфора до 0,035 %. Кроме того, в стали содержится до 0,25 % никеля и до 0,35 % хрома.

Качественная конструкционная сталь имеет наибольшее применение в технике, она отличается от обыкновенной стали большими прочностью, пластичностью и сопротивлением ударным нагрузкам.

Инструментальная углеродистая сталь характеризуется содержанием углерода от 0,7 % и выше. Она отличается

высокими твердостью, прочностью, предназначена для изготовления инструментов и штампов. По качеству эту сталь делят на качественную и высококачественную.

К недостаткам углеродистой стали относятся:

- 1) отсутствие сочетания твердости с прочностью и пластичностью;
- 2) высокий коэффициент теплового расширения;
- 3) потери твердости и режущей способности при нагревании до температуры 200 °С и прочности при повышении температуры;
- 4) низкая коррозионная стойкость в агрессивных средах, в атмосфере и при высоких температурах;
- 5) низкие электротехнические свойства;
- 6) увеличение массы изделий, удорожание их стоимости, усложнение проектирования вследствие невысокой прочности этой стали.

Таким образом, использование углеродистой стали допускается в тех случаях, когда эти недостатки существенно не влияют на эксплуатационные свойства изделий; кроме того, следует учитывать ее сравнительно невысокую стоимость.

Современная техника предъявляет к стали очень высокие требования в отношении физико-химических и механических свойств. Углеродистая сталь не всегда удовлетворяет этим требованиям вследствие вышеуказанных недостатков. Поэтому в технике широкое применение получила легированная сталь.

Легированные стали. Свойства, маркировка, применение. Легированная сталь наряду с обычными примесями содержит легирующие элементы, главным образом определяющие ее свойства. К легирующим элементам относят: хром, вольфрам, ванадий, молибден, никель, а также кремний и марганец в большом количестве и др. Легированная сталь обладает свойствами, которых нет у углеродистой стали, и она не имеет ее недостатков.

Применение легированной стали сокращает расход металла, повышает надежность и долговечность изделий. Влияние легирующих элементов на свойства стали показано ниже.

1. Хром повышает твердость и прочность стали, незначительно уменьшает пластичность. При содержании хрома выше 13 % сталь становится коррозионно-стойкой.

2. Никель придает стали высокие прочность, пластичность, коррозионную стойкость и повышает сопротивление удару.

3. Вольфрам резко увеличивает твердость и красностойкость стали.

4. Ванадий повышает плотность, прочность, способствует измельчению зерна, сопротивлению удару, истиранию, разрыву.

5. Кобальт повышает жаропрочность, магнитопроницаемость.

6. Молибден увеличивает красностойкость, упругость, прочность, сопротивление окислению при высоких температурах.

7. Кремний в количестве более 1 % повышает прочность, не уменьшая пластичности, увеличивает упругость, кислотостойкость и магнитопроницаемость.

8. Марганец, при содержании 1 % и более, увеличивает износоустойчивость без потери пластичности.

9. Алюминий увеличивает окалиностойкость.

10. Титан повышает прочность, уменьшает межкристаллитную коррозию.

11. Ниобий увеличивает сопротивление коррозии и кислотостойкость.

12. Цирконий придает прочность, способствует измельчению зерна.

13. Церий повышает прочность и пластичность.

14. Медь уменьшает коррозию.

В сталь вводят также редкоземельные элементы: неодим, цирконий, тантал, селен и др. Легированная сталь может одновременно содержать несколько легирующих элементов. По содержанию легирующих элементов сталь делят на низко-

легированную с содержанием легирующих элементов до 3 %, среднелегированную – от 3 до 10 %, высоколегированную – свыше 10 %. По назначению легированную сталь подразделяют на конструкционную, инструментальную и сталь с особыми физическими и химическими свойствами.

В маркировке легированной стали приняты следующие буквенные обозначения легирующих элементов: Х – хром, Н – никель, А – азот, В – вольфрам, Ф – ванадий, Г – марганец, Д – медь, П – фосфор, М – молибден, К – кобальт, С – кремний, Ю – алюминий, Ц – цирконий, Е – селен, Б – ниобий. Эти буквы в сочетании с цифрами образуют марку стали.

Конструкционную легированную сталь различают: качественную, высококачественную и особо высококачественную. Высококачественная обозначается буквой А в конце марки, а особо высококачественная – буквой Ш через черточку в конце марки.

Низколегированная сталь используется в строительстве, она прочнее углеродистой, лучше противостоит действию ударных нагрузок. Применение этой стали уменьшает массу конструкции на 15 ... 30 %.

Инструментальная легированная сталь применяется для изготовления режущих, измерительных, ударноштамповых инструментов. По качеству инструмент из этой стали значительно превосходит инструмент из углеродистой стали, он тверже, лучше противостоит износу. Режущий инструмент выдерживает большую температуру, не теряя своей твердости. В этом случае можно вести обработку на высоких скоростях резания. Легирующими элементами в инструментальной стали являются хром, вольфрам, ванадий и др. Они повышают стойкость инструмента, производительность его при металлообработке резко возрастает.

Стали и сплавы с особыми физическими и химическими свойствами имеют решающее значение в энергетике, ракет-

ной технике, в нефтегазовой промышленности и др. К этой группе сталей относят: магнитные, немагнитные, с высоким омическим сопротивлением, с особыми тепловыми и упругими свойствами.

Магнитные стали и сплавы делятся на магнитотвердые и магнитомягкие. Магнитотвердая сталь служит для изготовления постоянных магнитов.

Стали с особыми химическими свойствами приобретают большее значение в связи с распространением агрессивных сред, применяемых в химической и нефтегазовой промышленности и т.д. К ним относятся коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные стали.

По структуре после охлаждения в воздухе легированные стали разделяют на три основных класса: *перлитный*, *мартенситный* и *аустенитный*.

Ранее было отмечено, что легирующие элементы увеличивают устойчивость аустенита в перлитной области и понижают температуру мартенситного превращения. Поэтому при одинаковой скорости охлаждения до комнатных температур при разном содержании легирующих элементов и углерода получаются различные структуры.

6.4. ОТЖИГ И НОРМАЛИЗАЦИЯ

Процессы, связанные с нагревом и охлаждением железоуглеродистых сплавов, в результате которых изменяются их внутренняя структура и свойства, называют *термообработкой*.

После литья, проката,ковки и других видов обработки происходит неравномерное охлаждение заготовок.

Результатом является неоднородность структуры и свойств в различных местах заготовок, а также появление внутренних напряжений. Кроме того, при затвердевании отливки получают неоднородными по химическому составу вследствие ликвации. Для устранения таких дефектов производят термообработку, к которой относятся отжиг и нормализация.

Общее время нагрева изделий складывается из времени нагрева до заданной температуры t_n и времени выдержки t_b .

Время нагрева зависит от таких факторов как: способ нагрева, физические свойства подогреваемого металла, его химический состав.

Время выдержки t_b при температуре нагрева затрачивается на завершение процессов структурных превращений по всему объему изделия. Обычно $t_b \approx 0,2 t_n$.

Виды отжига. *Отжигом* называется нагрев стали выше температур фазовых превращений с последующим медленным охлаждением (обычно вместе с печью).

При медленном охлаждении сталь приближается к фазовому структурному равновесию. После отжига она имеет низкую твердость и прочность.

Основные цели отжига: перекристаллизация стали (измельчение зерна), снятие внутренних напряжений, снижение твердости и улучшение обрабатываемости.

В большинстве случаев отжиг является подготовительной термической обработкой. Отжигу подвергают отливки, проковки, прокат. В некоторых случаях отжиг является конечной термической обработкой, например, отжиг крупных отливок.

Существует отжиг 1-го и 2-го рода. Отжиг 1-го рода частично или полностью устраняет отклонения от равновесного состояния, возникшие при предыдущей обработке, причем его проведение не обусловлено фазовыми превращениями. Различают следующие разновидности отжига 1-го рода: диффузионный (отжиг гомогенизации), низкий и рекристаллизации.

Диффузионный отжиг – гомогенизация (рис. 6.7). Этому виду отжига подвергают отливки и слитки из легированных сталей для уменьшения дендритной ликвации. Металл нагревают до температур 1100 ... 1200 °С, так как при этом более полно протекают диффузионные процессы, необходимые для выравнивания химического состава в отдельных объемах стали.

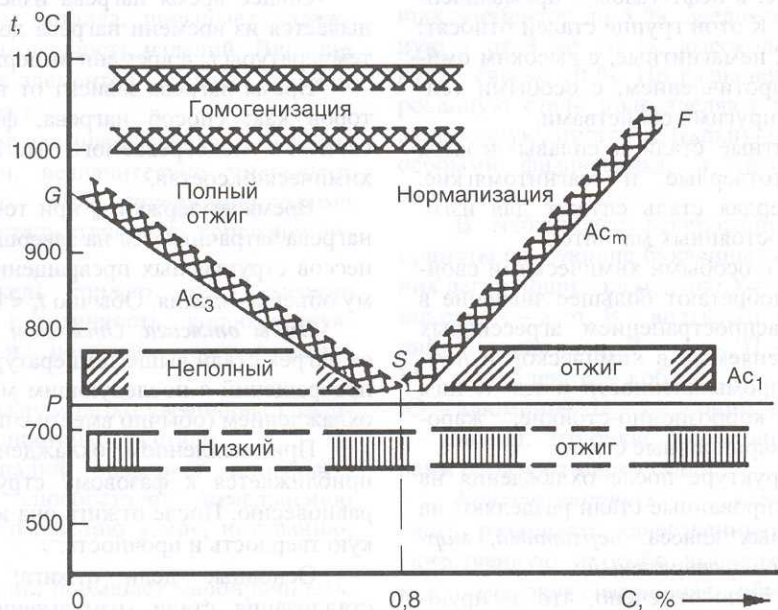


Рис. 6.7. Схема различных видов отжига

Нагрев осуществляется со скоростью $100 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C/ч}$, а продолжительность выдержки зависит от состава стали и массы садки. Охлаждение после диффузионного отжига медленное.

Низкий отжиг. Если структура стали после горячей механической обработки хорошая и нет необходимости в перекристаллизации, а требуется снять внутренние напряжения, то нагревают сталь несколько ниже Ac_1 . Нагрев осуществляют со скоростью $100 \dots 150 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ до температур $650 \dots 680 \text{ }^\circ\text{C}$, а после выдержки – охлаждение на воздухе. Выдержка при температуре отжига составляет $0,5 \dots 1,0 \text{ ч}$ на тонну садки.

Рекристаллизационный отжиг – это термическая обработка деформированного металла или сплава, при которой главным процессом является рекристаллизация. Данный вид термической обработки чаще применяют после холодной деформации.

Для каждого металла характерна своя температура начала рекристаллизации. Температура начала рекристаллизации

находится в определенной зависимости от температуры плавления

$$T_p = \alpha T_{пл},$$

где T_p – абсолютная температура рекристаллизации, К; $T_{пл}$ – абсолютная температура плавления, К; α – коэффициент. Коэффициент α зависит от чистоты металла. Для технически чистых металлов и сплавов он составляет $0,3 \dots 0,4$, для абсолютно чистых металлов – $0,1 \dots 0,2$, для сплавов твердых растворов – $0,5 \dots 0,6$, а в некоторых случаях достигает $0,8$.

Рекристаллизационный отжиг часто применяют как термическую обработку при холодной прокатке, штамповке и т.д.

Отжиг 2-го рода основан на использовании диффузионных фазовых превращений при охлаждении металлов и сплавов. Существуют следующие виды отжига 2-го рода: полный отжиг, неполный отжиг, изотермический отжиг.

Полный отжиг. При полном отжиге (рис. 6.7) доэвтектоидная сталь нагревается выше Ac_3 на $30 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$, выдерживается при этой температуре до полного про-

грева и медленно охлаждается. В этом случае ферритно-перлитная структура переходит при нагреве в аустенитную, а затем при медленном охлаждении превращается обратно в феррит и перлит. Происходит полная перекристаллизация.

На практике скорость нагрева обычно близка к $100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, а продолжительность выдержки колеблется от 0,5 до 1 ч на 1 т нагреваемого металла.

Основные цели полного отжига: устранение пороков структуры, возникших при предыдущей обработке металла (литье, горячей деформации, сварке и термообработке), смягчение стали перед обработкой резанием и снятие внутренних напряжений.

Неполный отжиг. Неполный отжиг (см. рис. 6.7) заключается в нагреве выше A_{c1} и медленном охлаждении. При этом происходит частичная перекристаллизация перлитной составляющей.

Неполному отжигу подвергают доэвтектоидные стали с целью снятия внутренних напряжений и улучшения обрабатываемости резанием в том случае, если предварительная горячая механическая обработка не привела к образованию крупного зерна.

Неполный отжиг заэвтектоидных сталей называется также *отжигом сфероидизации*. В результате отжига сфероидизации получают структуру – зернистый перлит. Охлаждение при сфероидизации должно быть медленным, чтобы обеспечить распад аустенита на ферритно-карбидную смесь и коагуляцию образовавшихся карбидов.

Отжиг сфероидизации может осуществляться также путем нагрева с периодическим изменением температуры около точки S .

Изотермический отжиг. В этом случае сталь нагревают, а затем быстро охлаждают (чаще переносом в другую печь) до температуры, лежащей ниже A_{c1} на 50 ... 100 $^{\circ}\text{C}$. При этой температуре сталь выдерживается до полного распада аустенита, после чего охлаждается на воздухе.

В настоящее время изотермический отжиг часто применяют для легирования сталей, так как он сокращает продолжительность процесса.

Для ускорения отжига температуру изотермической выдержки желателно выбирать близкой к температуре минимальной устойчивости переохлажденного аустенита в перлитной области.

После изотермического отжига получается более однородная структура, что связано с выравниванием температуры по сечению детали и превращением по всему объему одновременно. Целесообразно подвергать изотермическому отжигу детали небольших размеров.

Нормализация. Нормализацией называется нагрев доэвтектоидной стали до температуры выше A_{c3} , а в заэвтектоидной – выше A_{cm} на 50 ... 60 $^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением на воздухе. При нормализации происходит перекристаллизация стали, устраняющая крупнозернистую структуру, полученную при литье или ковке.

В результате охлаждения на воздухе распад аустенита на ферритно-цементитную смесь происходит при более низких температурах, а следовательно, повышается дисперсность смеси.

Назначение нормализации различно в зависимости от состава стали. Вместо отжига низкоуглеродистые стали подвергают нормализации. В результате твердость немного возрастает, но улучшается качество поверхности при резании.

Для среднеуглеродистых сталей нормализацию применяют вместо закалки и высокого отпуска (улучшения). Механические свойства при этом понижаются, но уменьшается деформация изделий по сравнению с получаемой при закалке.

Высокоуглеродистые (заэвтектоидные) стали подвергают нормализации с целью устранения цементитной сетки.

Нормализацию с последующим высоким отпуском (600 ... 650 $^{\circ}\text{C}$) часто применяют для исправления структуры легированных сталей вместо отжига.

Дефекты отжига и нормализации.

Дефекты при отжиге могут возникать вследствие неправильного хода нагрева, применения слишком высоких или слишком низких температур, чрезмерной продолжительности нагрева, из-за неподходящей атмосферы и неправильного режима охлаждения.

При слишком быстром нагреве, особенно изделий крупных размеров, в результате теплового расширения наружных слоев в середине изделия могут возникнуть большие растягивающие напряжения, вызывающие образование трещин. На опасность возникновения трещин необходимо обращать особое внимание при нагреве сталей с плохой теплопроводностью и высоким коэффициентом теплового расширения, например аустенитных.

При слишком высоких температурах отжига и чрезмерно длительных выдержках происходит образование крупнозернистой структуры, называемой структурой *перегрева*.

Перегрев характеризуется крупнокристаллическим блестящим изломом. Перегрев может быть устранен отжигом с фазовой перекристаллизацией, нормализацией или улучшением (закалка с высокотемпературным отпуском).

Очень большой перегрев кроме сильного роста зерна может вызвать повреждение границ зерен. Такой дефект называется *пережогом*. Пережог характеризуется оплавлением и в связи с этим окислением металла по границам зерен и не может быть исправлен термической обработкой. Пережог является неисправимым браком.

Избыток окислительных газов в атмосфере печи (кислорода, водяного пара, углекислоты и др.) вызывает окалинообразование и обезуглероживание.

Такие газы, как окись углерода, углеродород и т.п., приводят к появлению науглероженных поверхностей.

На практике всегда имеется более или менее окислительная печная атмосфера. Наблюдаемое в этих случаях обез-

углероживание наружных слоев оказывается иногда более вредным, чем окалинообразование.

Обезуглероживание связано с тем, что кислород окисляет углерод быстрее, чем железо. Для того, чтобы обезуглероживание не произошло, газовая атмосфера должна оказывать не очень сильное окислительное действие. Если скорость окисления больше скорости диффузии притекающего изнутри углерода, то происходит окалинообразование, так как в этом случае кислород может одновременно окислять углерод и железо.

Существенное влияние на обезуглероживание оказывает содержание водорода в печной атмосфере. Сухой водород практически не вызывает обезуглероживания, влажный водород приводит к сильному обезуглероживанию.

Обезуглероживание поверхности металла обуславливает неравномерную и неполную восприимчивость к закалке, например, инструментальных сталей. Кроме того, обезуглероживание способствует снижению усталостной прочности, ухудшению химических свойств поверхности изделий.

6.5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДЕФЕКТАХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Дефекты ухудшают физико-механические свойства металлов, например прочность, пластичность, плотность, электропроводность, магнитную проницаемость и т.д. Их часто разделяют на *явные* и *скрытые*. Первые обнаруживают при визуальном способе контроля или при помощи инструментальных средств и методов, которые приведены в нормативной документации. Если дефекты с большой вероятностью выявляются с помощью соответствующих инструментальных методов неразрушающего контроля, но не обнаруживаются визуально, то их относят тоже к явным. Скрытый дефект нельзя обнаружить предусмотренным методом и аппаратурой.

Дефекты также подразделяют на *критические*, наличие которых делает использование продукции по назначению невозможным или опасным; *значительные* – существенно влияющие на работоспособность продукции или ее долговечность; *малозначительные*, не оказывающие такого влияния, а также на *неустраняемые* и *устраняемые*.

По происхождению дефекты разделяют на *производственно-технологические* и *эксплуатационные*. К первым относят *металлургические* дефекты, которые возникают при отливке и прокатке; *технологические*, возникающие при изготовлении изделий и их ремонте, а к эксплуатационным – дефекты, возникающие после некоторой наработки изделий вследствие усталости металла, их элементов, коррозии, изнашивания, а также неправильного обслуживания и эксплуатации.

По количеству и характеру распределения в изделиях дефекты также могут быть *одиночными*, *местными* (трещины, раковины и т.п.), *распределенными в ог-*

раниченных зонах, например, зонах коррозионного поражения, *распределенными по всему изделию*, например, неоднородность химсостава; *наружные* (поверхностные и подповерхностные) и *внутренние* (глубинные).

По характеру геометрических параметров дефекты могут быть *точечные*, *линейные*, *плоскостные* и *объемные*.

В зависимости от размера дефекты металлов подразделяются на *субмикродефекты*, *микродефекты* и *макродефекты*.

К субмикродефектам относят дефекты кристаллической решетки металлов, которые в зависимости от геометрических признаков подразделяют на точечные, линейные, поверхностные и объемные (рис. 6.8).

К точечным дефектам относятся: примесные (чужеродные) атомы, замещающие основные атомы или ионы, образующие кристалл, или внедренные между ними; межузельные атомы, образующиеся в результате перехода атома из узла решетки в межузлие; вакансии, т.е. узлы решетки, в которых атомы отсутствуют.

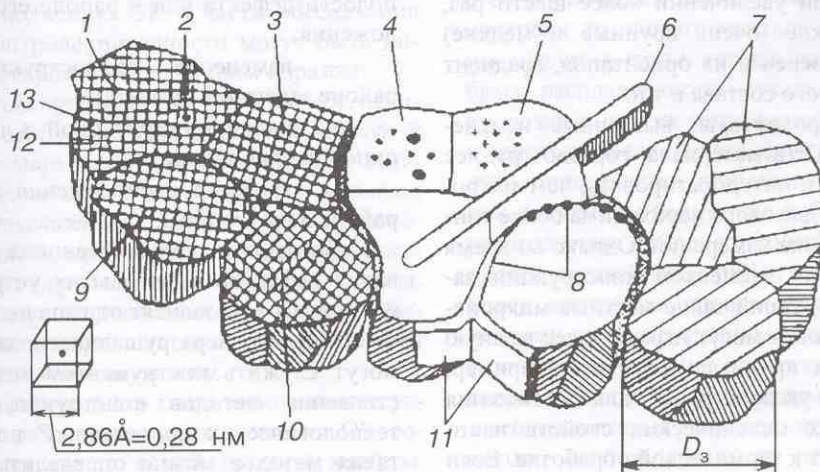


Рис. 6.8. Схематическое изображение структуры поликристаллического металлического сплава:

- 1, 2 – примесные (чужеродные) атомы замещения и внедрения соответственно;
- 3 – краевая дислокация; 4 – некогерентные выделения; 5 – когерентные выделения;
- 6 – тугоплавкие примесные включения; 7 – линии скольжения; 8 – выделения по границам зерен;
- 9 – элементарная ячейка α -железа; 10 – винтовая дислокация; 11 – пленочные выделения по границам зерен; 12 – вакансия; 13 – межузельный атом

Линейные дефекты решетки имеют малые размеры в двух измерениях и большую протяженность в третьем измерении. Они могут быть сформированы рядом вакансий или межузельными атомами. К таким дефектам относят также краевые и винтовые дислокации. Первые представляют собой края оборванных (лишних) атомных плоскостей, а вторые связаны с закручиванием атомных плоскостей в виде винтовой лестницы.

Поверхностные дефекты кристаллической решетки представляют собой поверхности раздела между отдельными зернами или субзернами в поликристаллическом металле или дефекты упаковки. На границах зерен обычно концентрируются примесные атомы, инородные включения и различного характера выделения.

К объемным дефектам относят скопление вакансий, примесей, включений и т.п. Субмикродофекты обнаруживают с использованием электронно-микроскопического, рентгеноструктурного анализа.

Микродофекты — это, например: микротрещины, микропоры и т.п., различимые при увеличении более шести раз, критические (очень крупные и мелкие) размеры зерен и их ориентация, градиент химического состава и т.п.

Микродофекты, вызванные изменением свойств материала, гораздо труднее выявлять и интерпретировать, чем макродефекты; для этого необходима более тонкая методика измерений. Однако во время выполнения элементом конструкции заданных функций такие местные микронеднородности могут играть более важную роль, чем крупные дефекты. Например, как было указано ранее, для достижения требуемых механических свойств часто прибегают к термической обработке. Если при этом не будет получен определенный размер зерна, то даже удовлетворительно сконструированный элемент конструкции может оказаться неспособным выполнять свое назначение.

Макродофекты могут быть мелкими и крупными. Мелкими называют дефекты,

например, поры, трещины, включения, различимые только с использованием лупы (увеличение до 6^х). Крупными порами, включениями и т.п. называют такие, которые при нормальном зрении различимы на стандартном расстоянии 25 см. Обычно для классификации и идентификации макродефектов используют их морфологические и генетические признаки.

Морфологические признаки:

- ориентация по отношению к оси изделия;
- расположение и распределение по длине или периметру изделия;
- изменение поперечных размеров изделия в районе дефекта;
- единичное или групповое расположение дефекта;
- периодичность его повторения;
- характер геометрических параметров дефекта и т.п.

Генетические признаки:

- механические, термические, коррозийные и т.п.;
- наличие неметаллических оксидных включений, окалины и смазки в полости дефекта или в районе его расположения;
- изменение микроструктуры в районе залегания дефекта;
- наличие структурной и ликвационной неоднородности;
- характер расположения зерен в районе дефекта и т.п.

Во многих случаях причина образования дефектов и методы их устранения одинаковы и не зависят от типа изделия.

Методы неразрушающего контроля могут служить инструментом совершенствования методов конструирования и технологических процессов. С помощью таких методов можно определить, где и каким образом возникают дефекты, чтобы затем устранить причину их возникновения. Неразрушающий контроль можно использовать также для того, чтобы контролировать технологический процесс, с тем чтобы обеспечить изготовление надежных изделий.

Одна из трудностей неразрушающего контроля состоит в том, что почти вся информация получается косвенным путем. Поэтому, чтобы сделать по полученной о дефектах информации правильные выводы, нужны определенные опыт и тренировка.

6.6. ТРЕБОВАНИЯ К КОНТРОЛЕПРИГОДНОСТИ ОБЪЕКТОВ И РАБОЧЕЙ СРЕДЫ

Дефектоскопическая технологичность (контролепригодность) объекта — это свойство конструкции объекта, обеспечивающее возможность, удобство и надежность ее контроля при изготовлении, техническом обследовании и ремонте.

Контролепригодными считают объекты, конструкция которых позволяет применить методы, средства и схемы контроля, обеспечивающие выявление всех предусмотренных нормативной документацией дефектов объекта контроля (ОК) с наименьшими затратами труда в процессе производства и эксплуатации.

Общие требования к конструктивному исполнению ОК в части обеспечения его контролепригодности могут быть интерпретированы следующим образом:

конструкция ОК должна обеспечивать свободный двусторонний доступ к контролируемому участку средств визуального контроля и/или дефектоскописта в соответствии с оптимальными схемами выполнения визуального и измерительного контроля таким образом, чтобы, например, сварное соединение можно было контролировать полностью, включая шов и околошовную зону.

Для среднего глаза минимальное угловое разрешение двух точек на ОК составляет около одной дуговой минуты. Это означает, что на расстоянии 300 мм от контролируемой поверхности ожидаемое разрешение — около 0,09 мм. На расстоянии 600 мм разрешение соответственно — 0,18 мм. Таким образом, глаз должен быть приближен к ОК для улучшения разрешения.

Однако глаз четко сфокусироваться на объект не может, если он приближается к ОК ближе чем на 250 мм. Следовательно, контроль невооруженным глазом должен осуществляться на расстояниях от 250 мм до 600 мм.

Также важен угол между направлением зрения и нормалью к контролируемой поверхности. Для большинства случаев он не должен быть больше 60° .

При визуальном контроле с использованием луп, последние должны располагаться на рабочих расстояниях от ОК по возможности ближе к глазу, так как при этом глаз воспринимает наибольшее количество света. При использовании лупы плоскость линзы должна быть параллельна плоскости исследуемого объекта.

Чистота поверхности ОК — это основное требование для надежного визуального контроля. Невозможно набирать визуальные данные о дефектности ОК за слоем непрозрачной грязи. Очистка ОК может производиться механическими и/или химическими средствами.

Очень часто подготовка поверхностей заключается только в зачистке зоны контроля до чистого металла от ржавчины, окалины, грязи, краски, масла, шлака, брызг расплавленного металла, продуктов коррозии и других загрязнений, препятствующих проведению контроля. Зона зачистки определяется нормативно-технической документацией на вид работы или на изготовление изделия. Зачистка поверхностей деталей (изделий) и сварных швов перед контролем производится металлическими щетками, напильником или абразивным кругом. При зачистке деталей и сварных швов из аустенитных сталей и высоконикелевых сплавов используются щетки, изготовленные из нержавеющей нагартованной проволоки.

Во многих случаях подготовка зоны контроля включает ее химическое травление, т.е. удаление части поверхностного слоя заготовки или изделия с помощью химических реакций. В зависимости от морфологии получаемой поверхности

химическое травление может быть выравнивающим (полирующим, шлифующим) и избирательным (селективным). При подготовке изделий к визуальному контролю в основном используют выравнивающее травление, при выполнении которого происходит сглаживание рельефа поверхности, уменьшение ее шероховатости. Подготовка ОК к травлению может требовать только очистки или очистки, шлифования и тонкой полировки.

Очистка растворителем. Первоначальная очистка подходящим растворителем удаляет грязь, смазку и масло и может облегчить удаление ржавчины. Одним из наиболее эффективных очищающих растворителей является смесь моющих средств и воды. Однако, если вода разрушительна для ОК, то используются органические растворители, такие как этиловый спирт, ацетон или бензин. Эти жидкости имеют низкую температуру возгорания и их применение может быть запрещено по условиям безопасности. В этом случае могут быть использованы такие растворители, как хлористые углеводороды и бензины с высокой температурой возгорания.

Химическая очистка. Химическая очистка используется для удаления красок, лакировок, окалины и других загрязнений, которые не удаляются методами очистки растворителем.

Шлифование. Под шлифованием понимают обработку поверхностей изделий абразивным инструментом. Производится на шлифовальных станках, металлорежущих станках и другом оборудовании с помощью специальных приспособлений (например, шлифовальных головок) и вручную. Шлифование позволяет получать поверхности с параметром шероховатости $Rz = 0,3 \dots 0,4$ мкм. При шлифовании температура в зоне резания достигает $1000 \dots 1500$ °С. Для сведения к минимуму нежелательных последствий влияния высокой температуры (образования прижогов и трещин на исследуемой поверхности, структурных превращений в поверхностном слое и др.) в зону резания

обильно подается смазывающе-охлаждающая жидкость.

Полирование. Полирование представляет собой совокупность процессов пластической микродеформации и тонкого диспергирования поверхностного слоя обрабатываемого изделия, происходящих при воздействии на слой полировальными и доводочными материалами. Обычный полирующий состав содержит окиси алюминия, магнезия, или окиси алюминия, магнезия, хрома, железа и алмаз с размерами частиц от 0,5 до 15 мкм. При полировании очень важно удалить все следы предыдущей обработки.

Травление. Материал, из которого изготовлен ОК, вид подготовки его поверхности перед травлением, типы дефектов ОК оказывают значительное влияние на дефектоскопическую эффективность (контрастирование дефектов) травления. В табл. 6.1 дается перечень широко известных реактивов для травления.

Реактивы для травления — это растворы кислот, щелочей и солей в воде или спирте. Растворы для травления должны быть свежими и при их изготовлении нужно прежде всего следить за их чистотой, концентрацией и выполнять требования безопасности. После надлежащей подготовки поверхности ОК и изготовления реактива его подача на поверхность ОК может производиться погружением или кистью. Выбор метода определяется характеристиками используемого реактива.

При погружении ОК полностью смачивается реактивом, который содержится в пригодном для этих целей сосуде. Для большинства реактивов (кроме фтористоводородной кислоты, концентрированной фосфорной кислоты, концентрированной щелочи и материалов, содержащих фтор) для этих целей можно использовать стеклянный сосуд. Травление может также производиться нанесением реактива для травления клубком хлопчатобумажных ниток, деревянной кистью с хлопчатобумажными нитями, щетинистой кистью, капельницей или стеклянной палочкой.

6.1. Реактивы для травления

Класс химических соединений (раствор)	Наименование	Концентрация, %	Химическая формула
Кислота	Хлористоводородная (соляная)	37	HCL
Кислота	Фтористоводородная	48	HF
Кислота	Азотная	70	HNO ₃
Кислота	Фосфорная	—	H ₃ PO ₄
Кислота	Серная	—	H ₂ SO ₄
Спирт	Нашатырный	—	NH ₄ OH
Щелочь	Едкий натр	—	NaOH
Соль	Персульфат аммония	—	(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈
Соль	Сульфат аммония	—	(NH ₄) ₂ SO ₄
Соль	Дихлорид меди	—	CuCL ₂
Соль	Хлорид железа	—	FeCL ₂
Соль	Йодид калия	—	KI
Элемент	Йод	—	I ₂
Спирт	Этиловый	—	C ₂ H ₅ OH
Спирт	Метиловый	—	CH ₃ OH
Слабая кислота	Перекись водорода	30	H ₂ O ₂

Инструмент для нанесения реактива на ОК должен быть инертным к реактиву. Например, концентрированная азотная кислота и растворы щелочей вступают в реакцию с хлопчатобумажной тканью. Эти реактивы для травления должны наноситься тонкой щетиной кистью.

Длительность травления определяется концентрацией раствора, состоянием поверхности ОК, его температурой и типом материала. При травлении поверхность ОК теряет свой блеск и степень ее матовости используется для того, чтобы определить момент прекращения травления.

После окончания травления ОК промывается, производится его сушка и удаление осадка с его поверхности. Промывка холодной водой обычно дает лучший вид поверхности, а промывка горячей водой — облегчает сушку.

Шероховатость поверхности ОК, т.е. совокупность неровностей поверхности с

относительно малыми шагами по базовой длине l , в значительной степени влияет на оптические свойства поверхности и ее дефектов.

Параметры шероховатости поверхности ОК и их числовые значения обычно устанавливаются в Руководящих документах на визуальный контроль. Так, согласно РД 03-606-03 параметры шероховатости зачищенных под визуальный контроль деталей (сварных соединений) должны составлять не более Ra 12,5 (Rz 80).

Ra — среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля y от средней линии в пределах базовой длины:

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|,$$

где l — базовая длина; n — число суммируемых отклонений профиля y .

Rz — сумма средних арифметических абсолютных отклонений точек пяти наи-

больших минимумов и пяти наибольших максимумов профиля в пределах базовой длины

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pmi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{\text{v}mi}|}{5},$$

где y_{pmi} – высота i -го наибольшего выступа профиля; $y_{\text{v}mi}$ – глубина i -й наибольшей впадины профиля. Величина R_z значительно (в 4 ... 5 раз) превышает величину R_a .

Наиболее распространенным способом определения шероховатости и волнистости поверхностей является сравнение этих поверхностей с поверхностями рабочих образцов. Сравнение осуществляется визуально.

Рабочие образцы шероховатости поверхности стандартизованы и выпускаются с шероховатостью разных классов, полученной точением, фрезерованием, строганием, шлифованием, растачиванием, развертыванием, протягиванием, полированием и доводкой.

Образцы по видам обработки комплектуются в оправках, и по применяемому материалу наборы помещаются в футляры. Чтобы глаза не утомлялись от излишнего напряжения при сличении двух поверхностей с параметрами шероховатости от $R_a 2,5$ до $R_a 0,16$, а также для усиления возможности человеческого глаза рекомендуется пользоваться лупой.

Для более точной оценки шероховатости поверхностей применяют микроскопы сравнения, а для определения величины шероховатости в микрометрах – различные микроскопы (интерференционный, двойной) и контактные щуповые приборы.

С помощью интерференционного микроскопа можно измерять параметр шероховатости поверхности от $R_a 0,16$ до $R_a 0,008$.

К контактно-щуповым приборам относятся приборы, называемые профилометрами и профилографами.

Профилометры предназначены для непосредственного показа среднего арифметического отклонения профиля поверхности R_a , а профилографы – для записи профиля поверхности в виде профилограммы.

При измерении шероховатостей на профилометре-профилографе допускаемая погрешность показаний составляет $\pm 10\%$, а при использовании дополнительных устройств – погрешность $\pm 16\%$.

На оптических приборах светового сечения и растровых измерительных микроскопах можно измерять высотные параметры в пределах от 0,5 до 80 мкм.

Освещение, температура, влажность и вентиляция воздуха, шум и вибрация, утомление – каждый из этих факторов настолько важен при визуальном контроле, что требует специального и подробного рассмотрения. Однако мы лишь коснемся каждого из этих факторов с точки зрения их влияния на деятельность специалиста по визуальному и измерительному контролю.

Нижеприведенный материал дается только для общеобразовательных целей. Несмотря на то, что в этой главе, как и в других главах, даются ссылки на некоторые нормативные документы, их тексты выправлены в стиле учебного пособия по неразрушающему контролю. Кроме этого, тексты нормативных документов обобщены для облегчения усвоения материала книги.

Освещение. При планировании системы освещения должны учитываться следующие важные факторы:

1. Освещенность контролируемых поверхностей ОК должна быть достаточной для надежного выявления дефектов и

соответствовать требованиям ГОСТ 23479-79 (в ред. 1990 г.), но в любом случае должна быть не менее 300 лк.

2. Равномерное освещение рабочего места.

3. Оптимальный яркостный контраст между поверхностными дефектами и фоном.

4. Отсутствие блескости как от источника света, так и от анализируемой поверхности ОК.

5. Соответствующее качество светильников и поверхностей. При низких интенсивностях света глаз может еще увидеть линию, толщина которой соответствует углу зрения около $10'$, в то время как при высоких интенсивностях человек способен различать линию, толщина которой воспринимается под углом менее чем $1''$. Это фактически меньше ширины одной колбочки.

Светильники, расположенные под потолком, следует, для устранения прямой блескости, загораживать экранами под углом примерно 45° . Недопустимы блики на стеклах очков. Во избежание их появления светильники должны быть расположены не менее чем на 30° выше оси зрения и не менее чем на 40° ниже оси зрения.

Продолговатые светильники следует располагать таким образом, чтобы длинная сторона световой арматуры была параллельна рабочей поверхности (длинной стороне объекта контроля). В противном случае может появиться большой блик поперек рабочей поверхности.

Окраску поверхностей стен, потолков, рабочих столов и стенов на участке визуального и измерительного контроля рекомендуется выполнять в светлых тонах (белый, голубой, желтый, светло-зеленый, светло-серый). Рекомендуемые значения коэффициента отражения таковы: для по-

толка $0,8 \dots 0,9$; для стен $0,4 \dots 0,6$; для пола – не менее 20 %; столы, скамьи и оборудование $0,25 \dots 0,4$.

Гармоничное сочетание цветов в рабочем помещении может повысить эффективность труда, а дисгармоничное их сочетание может породить состояние беспокойства и, следовательно, снизить его эффективность.

Акустика и борьба с шумом. Меры по улучшению акустических характеристик любого помещения должны быть направлены на подавление шума или звуков, присутствие которых нежелательно, а также на равномерное распределение звуковой энергии. Для защиты от шума высокой интенсивности следует принимать следующие меры: воздействовать на источник шума, создавать преграды между источником шума и людьми; изменить технологический процесс так, чтобы персонал меньше времени подвергался действию шума. Для промышленных предприятий уровень интенсивности звуков должен находиться в пределах $50 \dots 80$ дБ.

Температура и вентиляция. Выполнение умеренно сложных операций, например, таких, которые связаны со зрительным вниманием, возможно при довольно высоких температурах, вплоть до 30°C . В общем случае необходимо стремиться к созданию температурных условий среды в пределах зоны комфорта, показанной на рис. 6.9.

Рекомендуемая интенсивность вентиляции производственных помещений – $0,3 \text{ м}^3$ свежего воздуха в 1 мин на 1 м^2 пола обычного рабочего помещения.

Вибрация. Зрительное восприятие ухудшается под действием вибраций, особенно при частотах между $25 \dots 40$ и 60 и 90 Гц, с амплитудой более $1 \text{ мкм} \dots 10^{-3} \text{ м}$. В частности, вибрация оказывает вредное влияние на остроту зрения, причем на остроту бинокулярного зрения больше, чем монокулярного.

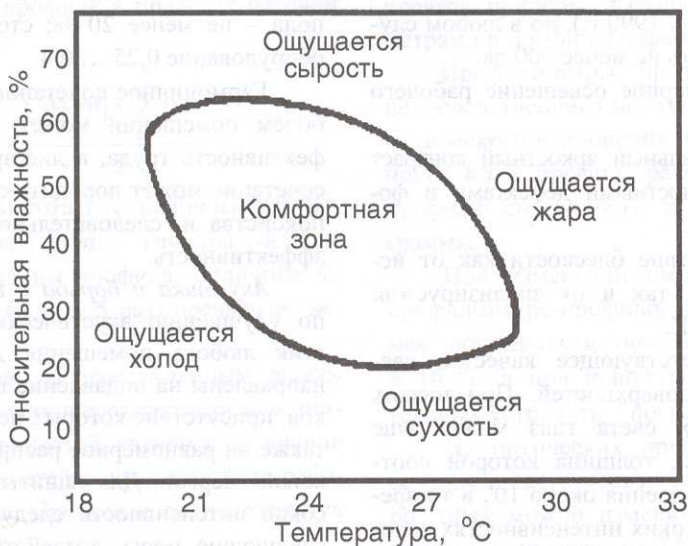


Рис. 6.9. Комфортные зоны по температуре и влажности воздуха

Настил пола должен быть выполнен так, чтобы он мог изолировать работника от электрического удара, вибраций и не впитывать в себя химические вещества.

Утомление. Утомление – это сложный процесс, который включает в себя как объективные физиологические сдвиги в организме человека, так и возникающие в результате этого ухудшение психиче-

ского состояния и снижение эффективности выполнения рабочего задания. Наиболее действенными путями борьбы с утомлением таковы: хорошее питание, устранение или снижение вредных воздействий (шум, вибрация), обеспечение оптимальных условий среды (температура, влажность, вентиляция), рациональная смена периодов работы и отдыха.

Глава 7

ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

7.1. МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ДЕФЕКТЫ

На рис. 7.1 схематически в упрощенном виде показана взаимосвязь между различными этапами переработки металла при производстве стальной продукции в черной металлургии.

Коротко процессы выплавки и разливки металла описаны в гл. 6. Дальнейшая переработка стали связана с обработкой ее давлением.

В этом процессе используется пластичность металла, т.е. способность деформироваться под действием внешних сил без разрушения и сохранять полученную форму и размеры после прекращения этого воздействия. При этом металл деформируется и испытывает напряжения двух видов: нормальные (растягивающие или сжимающие) и касательные (сдвиговые).

Различают деформацию упругую (обратимую) и пластическую (необратимую, остаточную). Пластическая деформация при обработке металлов давлением способствует образованию формы изделия, а упругая деформация затрудняет ее образование.

Процесс внутриверней деформации является основным, но не единственным при обработке металла давлением. В определенных условиях появляется смещение зерен относительно друг друга, т.е. будет наблюдаться межзеренная деформация.

Температура, при которой металл из напряженного состояния переходит в равновесие, называется *температурой рекристаллизации*.

В зависимости от температуры металла пластическая деформация может быть холодной или горячей.

Если обработка металлов давлением выполняется при температуре ниже температуры рекристаллизации, то такая обработка называется холодной.

Если обработка металлов давлением происходит при нагреве металлического тела выше температуры рекристаллизации, то она называется горячей.

Для получения заготовок металлы и сплавы обрабатывают давлением следующими способами: прокаткой, волочением, прессованием, ковкой и штамповкой.

Продольной прокаткой, волочением и прессованием получают заготовки постоянного поперечного сечения по длине, а поперечной и поперечно-винтовой прокаткой, ковкой и штамповкой получают заготовки, имеющие форму и размеры, близкие к готовым деталям.

Обработка давлением осуществляется путем воздействия инструментом на металл заготовки. Инструментами могут быть (рис. 7.2): при прокатке – валки, при волочении – матрица (волока), при прессовании – матрица, при объемной штамповке – верхняя и нижняя половинки штампа, при холодной штамповке – пуансон и матрица, при свободной ковке – верхний и нижний бойки.

Прокаткой называется процесс обжатия металла заготовки между вращающимися валками прокатного стана (рис. 7.2, а). Прокаткой изготавливают профили круглой и квадратной формы, рельсы, балки, полосы, листы и другие виды проката.

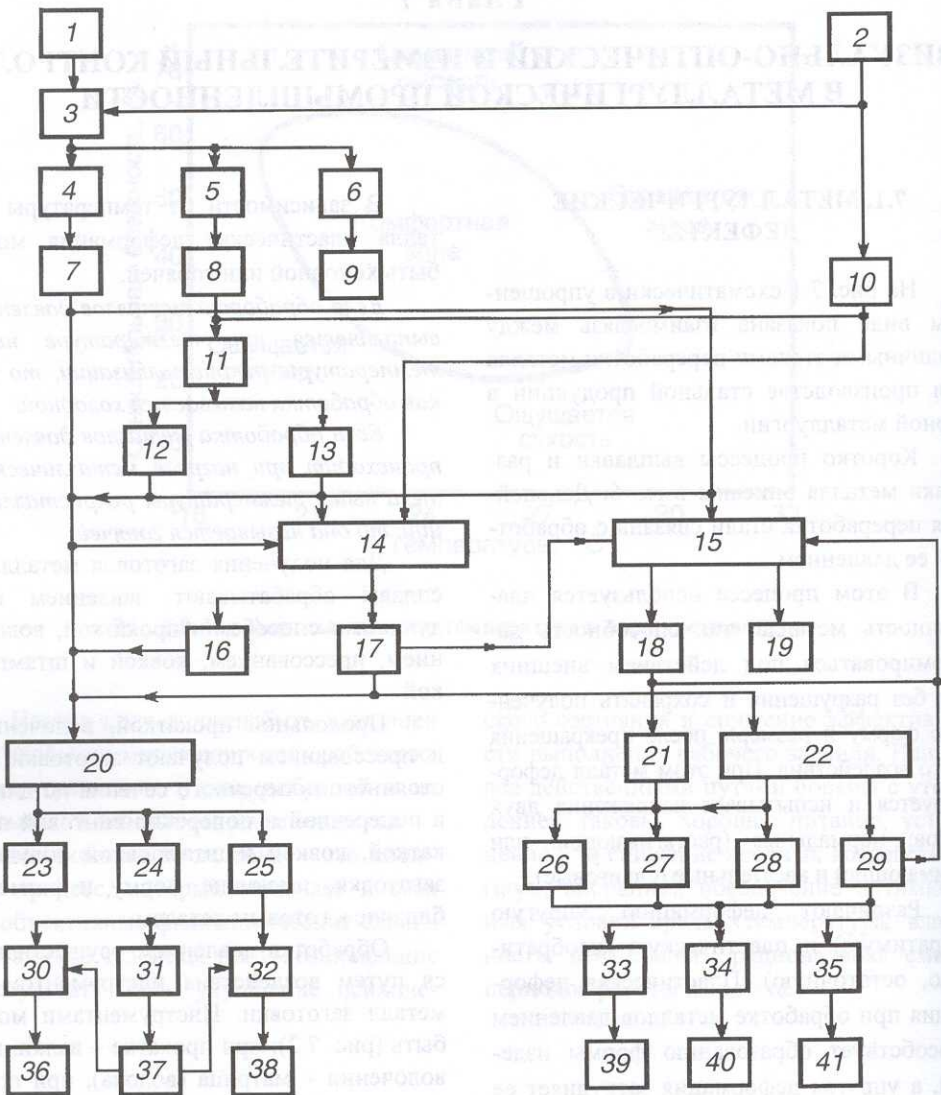


Рис. 7.1. Упрощенная схема взаимосвязи различных этапов металлургического производства:

1 – конвертер или мартеновская печь, или электродуговая печь; 2 – специальные методы выплавки; 3 – жидкая сталь; 4 – непрерывное литье; 5 – разливка в изложницы; 6 – литье; 7 – непрерывная заготовка; 8 – слиток (исходный сляб); 9 – отливки; 10 – слиток, непрерывная заготовка; 11 – блюминг и слябинг; 12 – сляб (прямоугольное поперечное сечение); 13 – блюм (квадратное поперечное сечение); 14 – заготовительный стан; 15 – кузнечно-прессовый цех; 16 – сутунка; 17 – заготовка; 18 – поковки; 19 – штамповки; 20 – чистовая линия прокатки; 21 – пресс; 22 – чистовая линия прокатки, трубопроводный стан; 23 – толстые листы; 24 – тонкие листы; 25 – горячекатанная полоса; 26 – профили; 27 – трубы; 28 – катанка; 29 – прутки; 30 – профилирование; 31 – цех холодной прокатки; 32 – трубосварочный цех; 33 – пилигримовый стан; 34 – волочение; 35 – обдирка; 36 – гнутые профили; 37 – полосы, тонкие листы; 38 – трубы; 39 – бесшовные трубы; 40 – трубы, прутки, спецпрофили, проволока; 41 – прутки после обточки

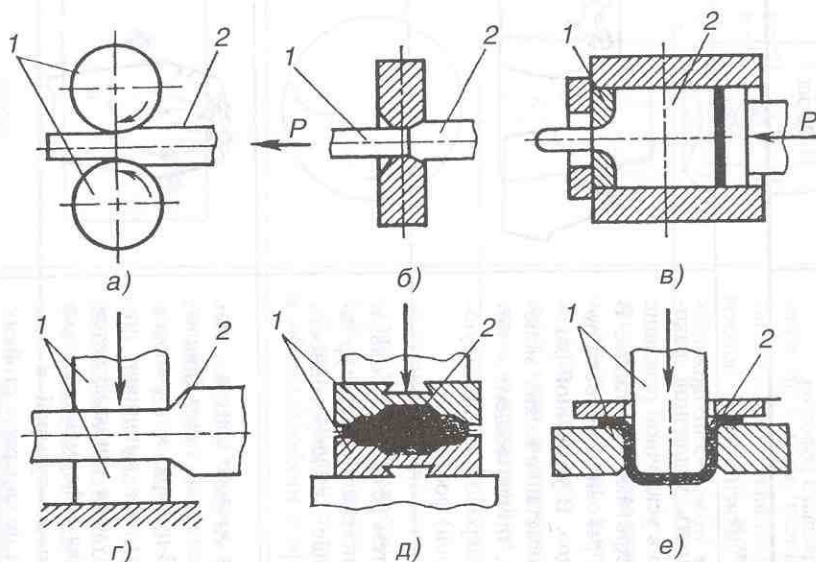


Рис. 7.2. Схемы основных способов обработки металлов давлением:
 а – прокатка; б – волочение; в – прессование; г – ковка; д – объемная штамповка;
 е – листовая штамповка; 1 – инструмент; 2 – заготовка

Волочением называют процесс протягивания прутка или проволоки через отверстие в волоке, размеры поперечного сечения которых становятся меньше, а длина – больше размеров исходной заготовки (рис. 7.2, б).


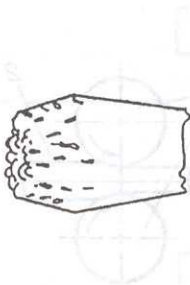
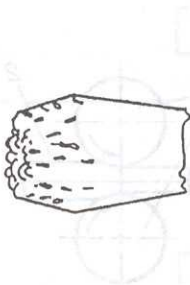
Прессованием называют процесс выдавливания металла через отверстие матрицы (рис. 7.2, в), формы и размеры которой определяют форму и сечение пресуемого изделия.

Ковка заключается в обжатии металла заготовки между верхним и нижним бойками (рис. 7.2, г) с применением разнообразного подкладного инструмента. Ковкой получают поковки больших и малых размеров на молотах и прессах.

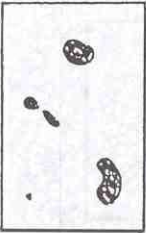
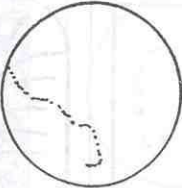
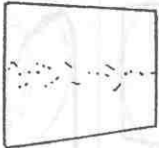
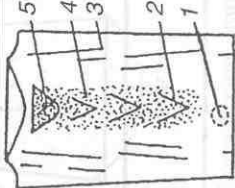
Штамповкой называют процесс деформирования металла в штампах. Штамповка может быть объемной (рис. 7.2, д) и листовой (рис. 7.2, е).

В табл. 7.1, 7.2 и 7.3 представлены как широко распространенные, так и сравнительно редко встречающиеся внутренние и поверхностные дефекты стали, характерные для металла разлитого в изложницы, а также образовавшиеся в процессе обработки металла давлением. Для классификации дефектов и их последующей идентификации были проанализированы их морфологические и генетические признаки.

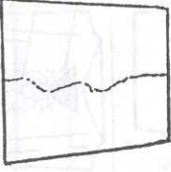
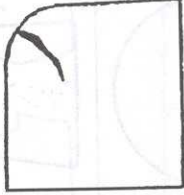

7.1. Дефекты слитков, проката и поковок металлоизделий из стали


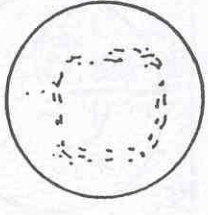
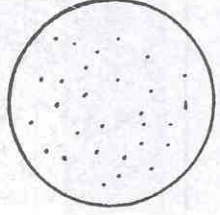
Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<i>Внутренние дефекты слитков</i>		
<p>1. <i>Усадочная раковина.</i> Дефект в виде открытой или закрытой полости, образовавшейся вследствие усадки при затвердении металла. При разливке стали в расширяющиеся кверху изложницы полость образуется в центре верхней части слитка, а при разливке в изложницы, расширяющиеся к низу – в нижней части слитка</p>	<p>Внутренняя поверхность усадочной раковины неровная. Часто в усадочной раковине обнаруживаются дендритные кристаллы. В открытой усадочной раковине полость покрыта пленкой оксидов. В усадочной раковине скапливаются неметаллические включения. Зона металла, прилегающего к полости, обогащена углеродом и ликвирующими примесями (серой) фосфором</p>	
<p>2. <i>Подусадочная ликвация.</i> Дефект в виде участка металла, обогащенного углеродом и ликвирующими примесями, расположенный под усадочной раковинной</p>	<p>Дефект проявляется тем резче, чем больше масса слитка, шире интервал температур затвердевания и меньше теплопроводность слитка</p>	
<p>3. <i>Рослый слиток.</i> Дефект в виде вспучивания в верхней части слитка с образованием крупных пузырей (свищей), вызванного бурным выделением газов при кристаллизации слитка</p>	<p>Причина образования рослого слитка – высокое содержание кислорода, газов (кислорода, азота) в стали. В пузырях встречаются неметаллические фазы, они заполняют опделенные участки пузыря или отлагаются на его стенках. Горячая деформация слитка приводит к завариванию пузырей в том случае, если их стыки не содержат стойких оксидов или силикатов</p>	

Продолжение табл. 7.1


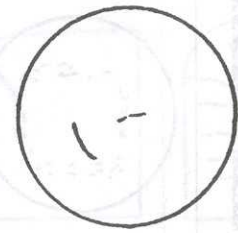
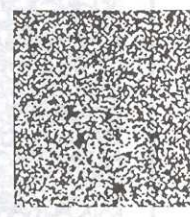
Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>4. <i>Пузырь</i>. Дефект в виде полости (округлой, овальной или продолговатой), образующийся в результате выделения газов при кристаллизации. Могут быть единичными, сдвоенными или строеными, располагаются произвольно по объему прутка или у его поверхности</p>	<p>В пузырях встречаются неметаллические фазы, они заполняют определенные участки пузыря или отлагаются на его стенках. Горячая деформация слитка приводит к завариванию пузырей в том случае, если их стенки не содержат стойких оксидов или силикатов</p>	
<p>5. <i>Корочка</i>. Дефект в виде участка металла, загрязненного неметаллическими включениями; располагается в объеме слитка или у поверхности. Корочки могут быть темными или светлыми</p>	<p>Темная корочка – дефект микроструктуры в виде участка металла с повышенным содержанием примесей (серы, фосфора и др.). Светлая корочка – дефект нижней части слитка, имеющего повышенную пористость</p>	
<p>6. <i>Осевая пористость</i>. Дефект в виде группы мелких пор в осевой части слитка. Располагается преимущественно в средней по высоте части слитка</p>	<p>Осевая пористость сопровождается межкристаллитными трещинами и неметаллическими включениями. Возникает при затвердевании последних порций жидкого металла в условиях недостаточного питания жидким металлом</p>	
<p>7. <i>U-образная ликвация</i>. Дефект в виде участков (полос), обогащенных (обедненных) серой, фосфором, углеродом и другими примесями. Может быть прямой или обратной: 1 – отрицательная ликвация; 2 – прямая U-образная ликвация; 3 – обратная U-образная ликвация; 4 – положительная ликвация; 5 – усадочная полость</p>	<p>U-образная ликвация может сопровождаться порами. Грубые ликвационные полосы при определенных условиях могут приводить к расслоению листа, труб и др. изделий</p>	

Продолжение табл. 7.1

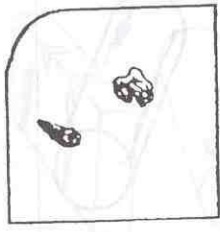
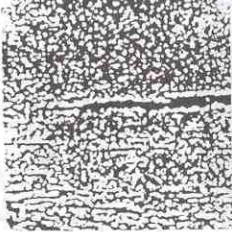
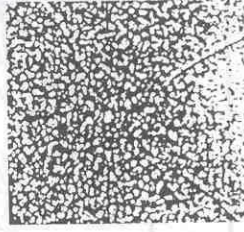
Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
8. <i>Межкристаллитные трещины.</i> Дефект в виде тонких нарушений сплошности, образующихся по границам кристаллов при низкой прочности этих границ вследствие усадочных, термических и структурных напряжений. Располагаются преимущественно в осевой зоне слитков	Пониженная прочность границ кристаллов часто связана с присутствием в них прослоек неметаллической фазы и ликватов	
9. <i>Угловая ликвация.</i> Дефект в виде обогащенного ликватами узкого участка в углах слитка	Возникает на стыке двух направленных от стенок изложницы фронтов кристаллизации и может переходить в трещину	
10. <i>Угловая трещина.</i> Дефект в виде разрыва, который может быть внутри слитка или выходит на поверхность по углам слитка	Возникает от растягивающих напряжений по участкам угловой ликвации в слитках большой массы	
11. <i>Ликвация.</i> Дефект в виде местной неоднородности слитка по составу, образующейся при его затвердевании. Ликвацией называется также процесс создания такой неоднородности. Различают дендритную и зональную ликвацию. Дендритная ликвация – неоднородность по составу	Причина дендритной ликвации – затвердевание слитка в некотором интервале температур. В начале затвердевания образуются дендриты первого порядка, обогащенные компонентами, имеющими более высокую температуру затвердевания, затем пер-	

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
осей и межосных участков в объеме дендрита. Зональная ликвация – неоднородность по составу различных зон слитка. В данном разделе рассмотрена дендритная ликвация. Различные виды зональной ликвации приведены в пунктах 2, 7, 9, 12, 13, 14	пендикулярно к первичным осям образуются оси второго порядка и далее ответвляются по оси более высоких порядков. При таком процессе в участках, расположенных между осями дендритов, находится жидкость, обогащенная легкоплавкими примесями, которая затвердевает последней. При деформации дендритное строение стали изменяется, однако полного выравнивания ее состава не достигается	
12. Ликвационный квадрат (круг). Дефект деформированного металла в виде местной структурной неоднородности, контуры которой вторяют форму слитка. Располагается за зоной столбчатых кристаллов. Может иметь значительную ширину. Ликвационный квадрат сочеат дендритную ликвацию с зональной	Примеси (фосфор, сера и др.), а также углерод оттесняются к концу зоны столбчатых кристаллов, обогащая слой жидкого металла, расположенного за этой зоной	
13. Точечная (точечно-пятнистая неоднородность). Дефект в виде локальных участков слитка, обогащенных ликвирующими примесями (С, S, N, O, P и др.). Точечная неоднородность располагается в средней части сечения заготовок, преимущественно в конце зоны столбчатых кристаллитов и в начале зоны равноосных кристаллов. В продольных разрезах слитков точечная неоднородность имеет вид ликвационных полосок, называемых внеосевой неоднородностью	Механизм образования шнуров внеосевой неоднородности состоит в том, что в слоях металла, обогащенных примесями вследствие зональной ликвации, развивается процесс дендритной ликвации, приводящей к локальным скоплениям примесей в межосных участках или на стыке кристаллитов	

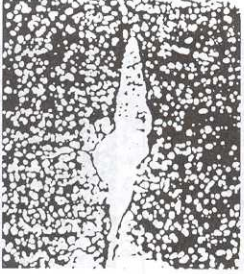
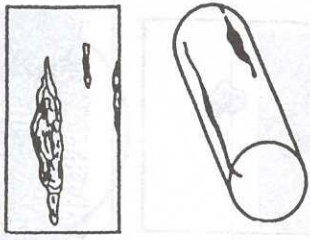

Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>14. <i>Пятнистая ликвация</i>. Дефект в виде локальных скоплений ликватов, расположенных в полостях газовых пузырей. Отличается от точечной неоднородности более крупными размерами пятен и более резко очерченными контурами, ограничивающими участки, обогащенные ликватами</p>	<p>Пятнистая ликвация возникает из-за высокого содержания в металле газов, приводящих к появлению пузырей. При кристаллизации стали газы могут выходить из пузырей и в их полости может проникать металл, обогащенный ликватами</p>	
<p>15. <i>Загрязнения и волосовины</i>. Загрязнение. Дефект представляет собой скопление неметаллических включений, попадающих в металл из внешних источников или образующихся в металле. Загрязнения бывают макроскопические, микроскопические и субмикроскопические, видимые соответственно невооруженным глазом, с помощью световых микроскопов и с помощью электронных микроскопов. Они располагаются в слитках произвольно по высоте и сечению в виде скоплений</p>	<p>По происхождению различают экзогенные, эндогенные и экзоэндогенные загрязнения. Эндогенные дефекты вызваны выделениями из жидкого металла при его охлаждении. Экзогенные дефекты вызваны выделениями из футеровки плавильных агрегатов, ковшей и т.п. В деформированном металле загрязнения вытягиваются вдоль направления деформации и образуют нитевидные дефекты, называемые волосовинами</p>	
<p>16. <i>Внутренние разрывы</i>. Дефекты, представляющие собой разрывы металла при его горячей деформации вследствие его перегрева в осевой зоне прутка. Разрывы обычно мелкие групповые, однако при сильном перегреве наблюдаются грубые разрывы</p>	<p>Образование разрывов от осевого перегрева связано с зональной дендритной ликвацией. При температуре нагрева слитков, превышающей оптимальную, ликвационные участки, расположенные преимущественно в междоусных участках дендритов в осевой зоне равноосных кристаллов и в зоне точечной и точечно-пятнистой ликвации подплаиваются, размягчаются</p>	

Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>17. <i>Инородные кристаллические включения.</i> Дефект представляет собой включения с металлургическим блеском и со структурой основного металла</p>	<p>Металлические включения попадают в металл из внешних источников, которые могут быть весьма разнообразными: куски прутков, маркировочных дужек, электродов; железо, образовавшееся в результате реакции его восстановления из окислы и т.п.</p>	
<p>18. <i>Внутренние трещины и разрывы от деформации.</i> Дефект, располагающийся преимущественно в центральной зоне прутков, образовавшийся при деформации вследствие высоких напряжений и малой пластичности металла. Внутренние разрывы от деформации могут различаться по внешнему виду в зависимости от условий деформации. Они могут быть в виде кольцевого креста, разветвленных разрывов, расходящихся от центра, округлых отверстий и т.п.</p>	<p>Дефектам этого вида подвержены, как правило, трудно деформируемые сплавы и стали, имеющие высокое сопротивление деформации и низкую пластичность. Дефектности способствуют применение больших частей обжатий и отклонения от оптимальной температуры деформации. Дефекты образуются при прокатке, но особенно часто, при ковке</p>	
<p>19. <i>Флокены.</i> Дефекты представляют собой тонкие разрывы металла округлой или овальной формы, образующиеся вследствие структурных напряжений в стали, насыщенной водородом</p>	<p>Флокены образуются преимущественно в процессе охлаждения стали после горячей деформации (часто) или после термической обработки (реже), а также при последующем хранении металла. Возникают флокены в процессе охлаждения при температуре ниже 260 °С. В локальных участках появляются микротрещины, которые постепенно увеличиваются в размерах</p>	


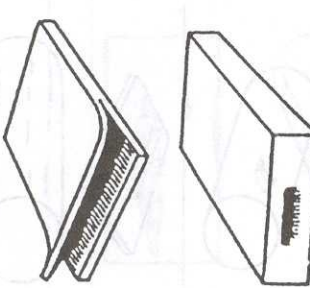
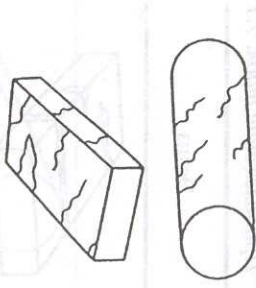
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>20. <i>Скворечник</i>. Дефект представляет собой раскрывшуюся при деформации поперечную термическую трещину в слитках или заготовках</p>	<p>При нагреве наружные слои металла нагреваются довольно быстро, благодаря поглощению теплоты лучей испускания от стенок разогретой печи, а внутренне — только за счет теплопроводности, причем этот процесс идет медленно. Увеличение объема внешних слоев металла создает растягивающие напряжения во внутренних холодных частях слитка, к тому же обладающих хрупкостью. Эти напряжения приводят к разрыву металла</p>	
<p>21. <i>Раскатанное (раскованное) загрязнение</i>. Дефект поверхности, представляющий собой вытянутое в направлении деформации раскатанное (раскованное) поверхностное загрязнение слитка или литой заготовки шлаком, огнеупором, теплоизоляционной смесью</p>	<p>В большинстве случаев загрязнение имеют экзогенное или экзоэндогенное происхождение. Загрязнения скапливаются на поверхности слитков в результате захвата за твердеющим металлом включений, всплывающих на поверхность жидкого металла, при заполнении изложницы</p>	
<p>22. <i>Раскатанная (раскованная) корочка</i>. Дефект поверхности, представляющий собой частичное отслоение или разрыв металла, образовавшийся в результате раскатки (расковки) завернувшихся корочек, имевшихся на поверхности слитка или литой заготовки и представляющих собой</p>	<p>Корки окисленного и загрязненного металлургическими включениями металла образуются на поверхности жидкого металла при заполнении изложниц. В случае холодного металла корки могут привариваться к стенке изложницы и оставаться там после</p>	

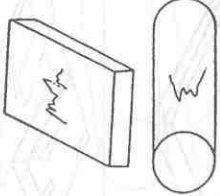

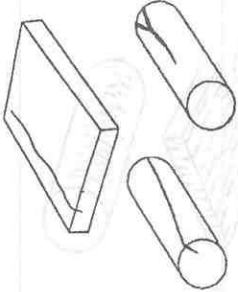
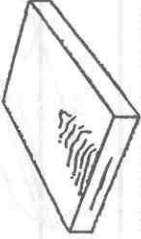
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>окисленный металл, сопровождающийся скоплениями неметаллических включений сложного состава. Может располагаться в любом месте по высоте слитка, но чаще встречается в его нижней части. Дефект может быть как единичный, так и поражать значительную часть слитка. При горячей деформации дефекты вытягиваются вдоль ее направления</p>	<p>затвердевания данного участка металла. Периодические поперечные завороты, опоясывающие слитки по всему периметру, связаны с остыванием слоев металла у стенок изложницы и последующей заливкой этих слоев жидким металлом</p>	
<p>23. <i>Волосовина</i>. Дефект поверхности в виде нитевидных несплошностей в металле, образовавшихся при деформации имеющихся в нем неметаллических включений. Протяженность волосовин может быть различной при незначительной глубине и ширине</p>	<p>В наибольшей степени волосовинами поражаются стали, легированные титаном, высокохромистые и высокомарганцовистые, а также стали, легированные алюминием. Длина волосовин зависит от размера загрязнения и степени вытяжки и возрастает с увеличением этих параметров</p>	
<p>24. <i>Раскатанный (раскованный) пузырь</i>. Дефект поверхности в виде прямолинейной продольной различной протяженности и глубины тонкой трещины, образовавшейся при раскатке (расковке) наружного или подповерхностного газового пузыря слитка или литой заготовки. Дефект часто располагается группами. Иногда встречаются единичные дефекты. На микрошлифе полость дефекта имеет форму мешка, обычно заполнена окислами и располагается перпендикулярно и в под различными углами к поверхности заготовки</p>	<p>Раскатанные газовые пузыри отличаются от волосовин значительно большей протяженностью и раскрытием, а также часто большей глубиной. Протяженность дефекта возрастает с увеличением вытяжки металла при деформации. К дефекту прилежит обезуглероживленная зона с четкими границами, насыщенная мелкими частицами оксидов</p>	

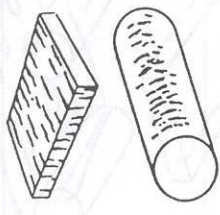

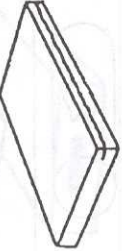
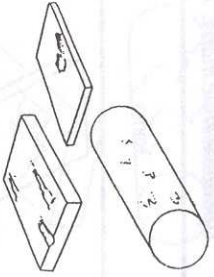
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>25. <i>Пузырь-вздутие</i>. Дефект поверхности в виде локализованного вспучивания металла, образующегося на поверхности листа и ленты из-за повышенного местного загрязнения металла газами или металлическими включениями</p>	<p>Выделение газов из жидкого металла с образованием пузырей может происходить как из-за высокой концентрации в металле кислорода и азота, так и вследствие поступления газов из внешних источников. Так, образование пузырей-вздутия способствует травлению металла с насыщением его водородом или нагрев</p>	
<p>26. <i>Расслоение</i>. Дефект поверхности в виде трещин на краях и торцах листов и других видов проката, образовавшихся при наличии в металле усадочных дефектов, внутренних разрывов, повышенной загрязненности неметаллическими включениями и при пережоге</p>	<p>Расслоение может сопровождаться вздутием поверхности листа. Расслоение может быть обнаружено при резке металла</p>	
<p>27. <i>Слиточная рванина</i>. Дефект поверхности в виде разрыва, образовавшегося в начале прокатки (ковки) по участкам слитка, пораженного дефектами, или при горячей деформации металла из-за пониженной пластичности</p>	<p>Дефект обусловлен нарушением технологии выплавки и разливки металла. При резко пониженной пластичности металла возможно образование грубых рванин после первого обжатия в валках или первых ударах молота при ковке</p>	

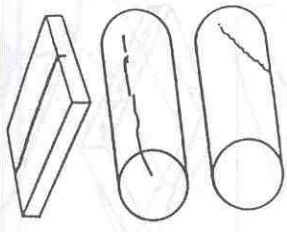

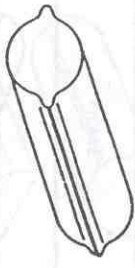
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>28. <i>Слиточная плена</i>. Дефект поверхности в виде отслоения языкообразной формы, частично соединенного с основным металлом, образовавшегося от раската окисленных брызг, заплесков и грубых неровностей поверхности слитка, обусловленных дефектами внутренней поверхности изложницы</p>	<p>Деформация заготовок с рванинами также приводит к образованию таких дефектов. На микрошлифе нижняя поверхность слиточной плены и находящийся под ней металл загрязнены оксидами или нитридами, или частицами утепительной смеси, и обычно обезуглерожены</p>	
<p>29. <i>Раскатанный пригар</i>. Дефект поверхности в виде темного пятна неправильной формы, образовавшегося от раската куска металла, приварившегося к слитку из-за нарушения технологии разливки или из-за неисправности изложницы</p>	<p>При выгорании или выпадении раскатанного пригара на поверхности листа остаются углубления с разрывами по краям</p>	
<p>30. <i>Раскатанная (раскованная) трещина</i>. Дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, образовавшийся при раскатке (расковке) продольной или поперечной трещины слитка или литой заготовки</p>	<p>На микрошлифе трещина располагается под прямым или острым углом к поверхности, у поверхности более широкая с постепенным сужением вглубь, извилистая, имеет разветвленный конец. Стенки дефекта покрыты окалинной, прилегающие к ним участки обезуглерожены и насыщены диффузионными оксидами</p>	
<p>31. <i>Гармошка</i>. Дефект поверхности листа в виде чередующихся вздутый, идущих попереक прокатки от торца по плоскости листа, образовавшихся при наличии полостей и рыхлости в осевой зоне слитка</p>	<p>Между волнами гармошки могут возникать разрывы металла. На микрошлифе в осевой зоне под гармошкой обнаруживается нарушение сплошности металла, частицы включений и зоны ликвации</p>	

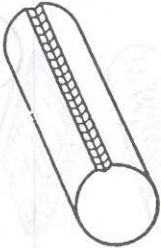
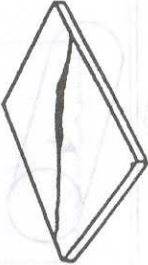
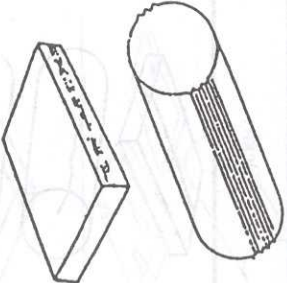
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p><i>Дефекты поверхности, образованные в процессе деформации</i></p> <p>32. <i>Деформационная рванина</i>. Дефект поверхности в виде раскрытого разрыва, расположенного поперек или под углом к направлению наибольшей вытяжки металла при прокатке или ковке, образовавшийся вследствие пониженной пластичности металла. Рванины на прокате обычно расположены полосами вдоль направления деформации, часто периодически повторяясь</p>	<p>Причина пониженной пластичности обусловлена технологией выплавки металла или нарушением режимов нагрева, или деформацией. На микрошлифе в зоне дефекта наблюдаются разветвленные разрывы металла</p>	
<p>33. <i>Рванина на кромках</i>. Дефект поверхности листа и ленты в виде разрыва металла по кромкам листа и ленты, образовавшегося из-за нарушения технологии прокатки, а также при прокатке металла с пониженной пластичностью, обусловленной технологией выплавки</p>	<p>В зоне рванин микроструктура обычно крупнозернистая и по границам зерен наблюдаются разрывы, заполненные оксидами</p>	
<p>34. <i>Затянутая кромка</i>. Дефект поверхности в виде раскатанной складки на кромке листа, напоминающей по форме зигзагообразную трещину, образующуюся при прокатке без кантовки или путем закатки наплывов, появляющихся при деформации слитков с непрогретой сердцевинной</p>	<p>На поперечном микрошлифе около затянутой кромки наблюдается обезуглероживание металла и закат окалина</p>	
<p>35. <i>Прокатная илена</i>. Дефект поверхности представляющий собой отслоение металла языкообразной формы, соединенное с основным металлом одной стороной, образовавшееся вследствие раскатки или расковки рванин, подрезов, следов глубокой зачистки дефектов или сильной выработки валков, а также грубых механических повреждений</p>	<p>На микрошлифе в зоне дефекта может наблюдаться окалина, металл обезуглерожен. Если рванины возникают до передела (горячей деформации), то обезуглероживание и окисление в зоне дефекта могут отсутствовать или быть незначительными</p>	

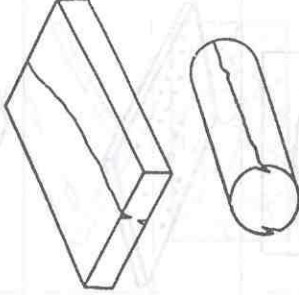

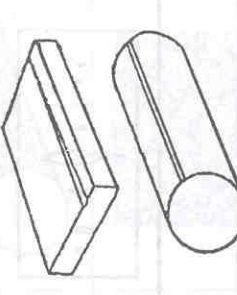
Продолжение табл. 7.1

<p>Термины, определения дефектов и их морфологические признаки</p>	<p>Генетические признаки дефектов</p>	<p>Эскиз</p>
<p>36. <i>Трещина напряжения</i>. Дефект поверхности, представляющий собой разрыв металла, идущий вглубь под прямым углом к поверхности, образовавшийся вследствие напряжений, связанных со структурными превращениями или неравномерным нагревом и охлаждением</p>	<p>На микрошлифе трещина напряжения имеет разветвленный конец и проходит по границам зерен. Окисление и обезуглероживание в зоне дефекта происходит только при последующем нагреве. Возникающая на поверхности трещина может углубляться. Часто трещины образуются при вылеживании стали</p>	
<p>37. <i>Скворечник</i>. Дефект поверхности в виде выходящей на поверхность полости со сглаженными и окисленными стенками, образовавшейся при ковке или прокатке в результате раскрытия внутренней трещины, которая возникла под действием напряжения при нагреве холодного металла</p>	<p>Наружные слои металла нагреваются довольно быстро, благодаря поглощению теплоты лучеиспускания от стенок разогретой печи, а внутренние — только за счет теплопроводности, причем этот процесс идет медленно. Увеличение объема наружных слоев металла создает растягивающие напряжения во внутренних холодных частях слитков и заготовок, к тому же обладающих значительной хрупкостью, под воздействием этих напряжений, возникающих во внутренней зоне слитка (или заготовки), происходит разрыв металла</p>	
<p>38. <i>Ус</i>. Дефект поверхности, представляющий собой продольный выступ с одной или двух диаметрально противоположных сторон прутка, образовавшийся вследствие неправильной подачи металла в калибр, переполнения калибров или неправильной настройки валков и привальной арматуры</p>	<p>Переход уса к поверхности прутка обычно плавный. Микроструктура стали в зоне дефекта не изменяется. При последующей прокатке в процессе кантовки усы прикатываются к поверхности, образуя закаты</p>	


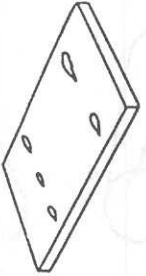

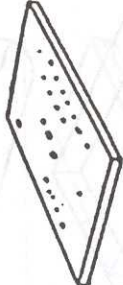
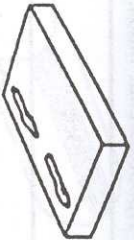
Продолжение табл. 7.1

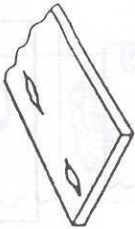

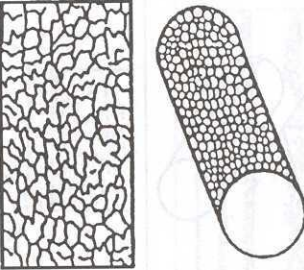

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>39. <i>Подрез</i>. Дефект поверхности в виде продольного углубления, расположенного по всей длине или на отдельных участках поверхности проката и образовавшегося вследствие неправильной настройки привалковой арматуры или одностороннего перекрытия калибра. Прикатанный подрез может иметь волнистый или зазубренный край</p>	<p>Микроструктура металла в зоне прикатанного подреза характеризуется обезуглероживанием и наличием вкатанной окалины. На профиле круглого сечения подрез образуется чаще всего в процессе прокатки по схеме квадрат-овал</p>	
<p>40. <i>Порез</i>. Дефект поверхности тонкого листа в виде частично закатанной складки, расположенной вдоль или под углом к направлению прокатки, образовавшейся из-за деформации различной степени по ширине листа и иногда сопровождаемой сквозным разрывом металла</p>	<p>Возникновению дефектов способствует применение больших частых обжатий и отклонение от оптимальной температуры деформации</p>	
<p>41. <i>Морщины</i>. Дефекты поверхности в виде группы чередующихся продольных углублений и выступов, располагающихся, в основном, по всей длине раската, преимущественно в зоне, соответствующей разьему валков, и образовавшихся при повышенных обжатиях боковых грашей. На листах дефект располагается, в основном, на краях из-за неравномерной деформации по высоте заготовки. Дефект может иметь вид прикатанных складок</p>	<p>Морщины могут возникать также и при прокатке сплюснутого овала на круг или вытянутого ромба на квадрат. На микрошлифе дефект имеет вид полости с закругленными концами, частично заполненной окалиной. В зоне дефекта иногда наблюдается местное увеличение обезуглероженого слоя</p>	

Продолжение табл. 7.1

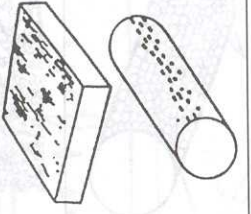
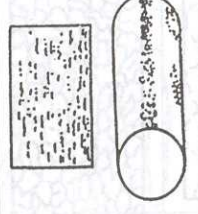
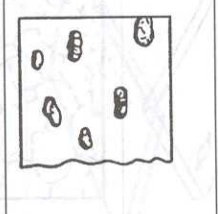
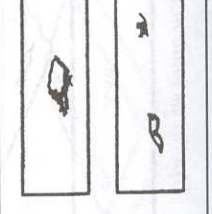
Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>42. <i>Закат</i>. Дефект поверхности, представляющий собой прикатанный продольный выступ, образовавшийся в результате закатывания уса, подреза, грубых следов зачистки и глубоких рисок. Дефект часто расположен с двух диаметрально противоположных сторон и может иметь зазубренный край</p>	<p>Дефект может также формироваться из-за неправильной подачи заготовок в калибры. На поперечном микрошлифе дефект располагается под острым углом к поверхности без разветвления, заполнен окалиной и сопровождается искажением структуры. Металл вокруг дефекта обезуглерожен</p>	
<p>43. <i>Заков</i>. Дефект поверхности, представляющий собой придавленный выступ, образовавшийся при ковке в результате неравномерного обжатия. Заков на прутке имеет изогнутый волнистый вид и может распространяться на значительное расстояние вдоль прутка или быть коротким</p>	<p>Причиной закова является неравномерное обжатие при ковке металла, приводящее к образованию местных складок, которые затем приковываются к металлу. На микрошлифе конец закова заполнен окалиной и сопровождается искажением структуры. Металл в зоне дефекта обезуглерожен</p>	
<p>44. <i>Риска</i>. Дефект поверхности в виде канавки без выступа кромок с закругленным или плоским дном, образовавшийся от царапания поверхности металла изношенной прокатной арматурой. Риски могут быть тонкими и более широкими. Распространяются риски обычно вдоль всего прутка</p>	<p>Дефект не сопровождается изменением структуры и неметаллическими включениями. На последующих операциях риски могут прикатываться. Риски образуются большей частью при прокатке низкоуглеродистой стали</p>	





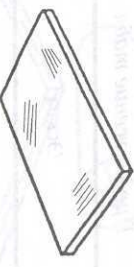
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
45. <i>Сквозные разрывы</i> . Дефект поверхности в виде сквозных несплошностей листа и ленты, образующихся при деформации полосы неравномерной толщины или с вкатанными инородными телами	Причиной неравномерной толщины полосы может быть зачистка дефектов на глубину, превышающую допуск, наличие рыхлости и поперечная разнотолщинность	
46. <i>Надрывы</i> . Дефект поверхности в виде поперечных несквозных разрывов на тонких листах, образующихся при прокатке в местах забоин, углублений от зачистки, раскатынных загрязнений и окалин	Возникновению дефектов способствует применение больших частых обжатий и отклонение от оптимальной температуры деформации	
47. <i>Продир</i> . Дефект поверхности в виде широких продольных углублений, образующихся от резкого трения проката о детали прокатного и разъемно-транспортного оборудования	Возникновению дефектов способствует применение больших частых обжатий и отклонение от оптимальной температуры деформации	
48. <i>Наколы-проколы</i> . Дефекты поверхности в виде периодически повторяющихся точечных углублений или сквозных отверстий, образовавшихся от соприкосновения ленты с острыми углами наваров на роликах термических печей, травильных агрегатов и вспомогательного оборудования	Дефектам этого вида подвержены, как правило, легко деформируемые сплавы и сталь, имеющие низкое сопротивление деформации и высокую пластичность	
49. <i>Отпечатки</i> . Дефект поверхности в виде углублений или выступов, расположенных по всей поверхности или на отдельных ее участках, образовавшихся от выступов и углублений на прокатных валках, роликах или ковочном инструменте	Глубина или высота отпечатков, как правило, небольшая, и если отпечатки образуются на заготовках, то при последующем нагреве и деформации они обычно устраняются и металл приобретает гладкую поверхность	


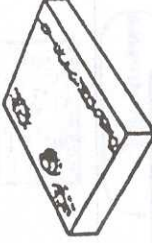
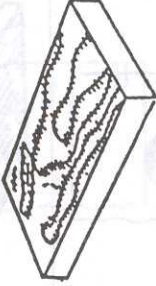

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>50. <i>Раскатанные отпечатки</i>. Дефект поверхности в виде светлых пятен или матовых полосок, образующихся при холодной прокатке подката, имеющего отпечатки, а также раковины-вдавы, забоины, продеры или следы глубокой зачистки</p>	<p>На микрошлифе наблюдается местное, в виде пленочек, отслоение металла</p>	
<p>51. <i>Сетка отпечатков</i>. Дефект поверхности в виде периодически повторяющихся, имеющих форму сетки выступов, образующихся от вдавливания прокатываемого листа или ленты в трещины изношенных валков</p>	<p>Сетка отпечатков обычно встречается на одной стороне листа</p>	
<p>52. <i>Чешуйчатость</i>. Дефект поверхности, представляющий собой отслоения и разрывы в виде сетки, образовавшиеся вследствие перегрева или пониженной пластичности металла периферийной зоны. Дефект подобен прокатным пленам, но отличается от них малой глубиной и большей степенью напряжения поверхности</p>	<p>Снижение пластичности может быть вызвано выделением по границам зерен легковплавких составляющих или насыщением поверхности металла серой при нагреве его в среде сернистых газов. На микрошлифе разрывы совпадают с границами зерен и сопровождаются оксидами и эвтектическими фазами. Чешуйчатость встречается у низкоуглеродистых конструкционных сталей, в том числе, легированных, и у сталей, содержащих более 0,25 % меди</p>	
<p>53. <i>Перегрев поверхности</i>. Дефект в виде шероховатости поверхности с крупным зерном, рыхлой окалиной и сеткой трещин по границам крупных кристаллов, образующейся при превышении температуры и времени нагрева</p>	<p>На поверхности создаются условия для образования крупных зерен путем слияния групп мелких зерен с малыми разориентировками в одно крупное зерно</p>	

Продолжение табл. 7.1

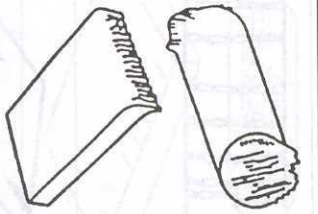
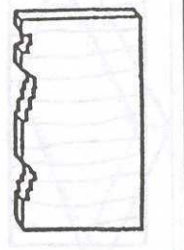
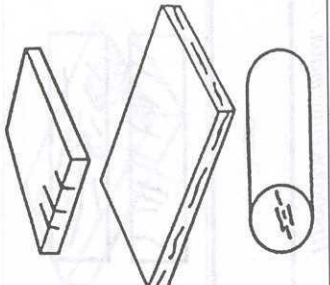
Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>54. <i>Вкатанная окалина</i>. Дефект поверхности в виде вкрапленных остатков окислы, вдавливаний в поверхность металла при деформации</p>	<p>Дефект образуется при горячей прокатке в том случае, если окалина плохо убирается в первых проходах и вдавливается в металл при дальнейших проходах</p>	
<p>55. <i>Рябизна</i>. Дефект поверхности в виде мелких углублений, образующих полосы или сетку, наблюдаемых после удаления вкатанной окислы. Может занимать значительную поверхность, располагаясь преимущественно отдельными участками вдоль направления деформации</p>	<p>Рябизна образуется при деформации металла с окалиной, плотно прилегающей к металлу и не осыпавшейся при первых обжатиях</p>	
<p>56. <i>Раковины от окислы</i>. Дефект поверхности в виде отдельных углублений, частично вытянутых вдоль направления прокатки, образующихся при вытравливании и выпадении вкатанной окислы. Раковины от окислы отличаются от рябизны большими размерами и меньшим количеством</p>	<p>При горячей прокатке и больших обжатиях окалина выкатывается, а при небольших — может частично оставаться на поверхности прутков. При холодной прокатке раковины располагаются дорожками вдоль прутков</p>	
<p>57. <i>Вкатанные металлические частицы</i>. Дефект поверхности листа в виде приварившихся и частично закатанных кусочков металла</p>	<p>К вкатаным металлическим частицам относятся: стружка, отслои от рваных кромок листа. Причиной дефекта может быть также кусок всплывшей от поддона шайбы или скрапина, внедрившаяся в металл при горячей деформации слитка</p>	

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>58. <i>Раковина-вдав.</i> Дефект поверхности листа и ленты в виде одиночного углубления, образовавшегося при выпадении или вытравливании вкатанной инородной частицы</p>	<p>Дефект повторяет форму вкатанного предмета</p>	
<p>59. <i>Отстающая окалина.</i> Дефект поверхности в виде отдельных участков отслоившейся или рыхлой окалины, образующийся при нарушении технологии нагрева перед прокаткой или при дальнейшей термической обработке</p>	<p>Отстающая окалина является дефектом листа, на котором тонкий слой окалины является защитным покрытием</p>	
<p>60. <i>Вкатанные инородные частицы.</i> Остатки подмоточной бумаги, кусочки дерева или гуммировки роликов на поверхности холоднокатаного листа или ленты</p>	<p>Дефект образуется, например, при деформации металла с бумагой, плотно прилегающей к металлу</p>	
<p>61. <i>Заплески.</i> Дефект поверхности в виде полосок от натеков оплавленного металла, образующихся при нарушении технологии огневой зачистки дефектов</p>	<p>В местах заплесков наблюдаются углубления и изменение микроструктуры основного металла</p>	
<p>62. <i>Следы абразивной зачистки.</i> Дефект поверхности ленты в виде участков с повышенной шероховатостью</p>	<p>Образуются после зачистки полосы абразивным инструментом с грубым зерном</p>	

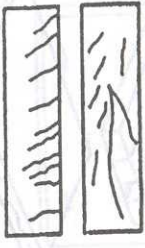
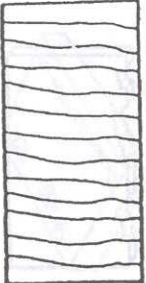

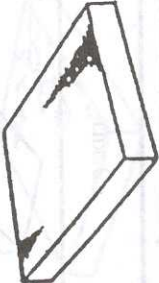
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
63. <i>Серые пятна.</i> Дефект поверхности ленты в виде светло- или темно-серых пятен, расположенных в строчку или группами	Образуются от раската вкатанной окалины или незначительных углублений	
64. <i>Пятнистое науглероживание.</i> Дефект поверхности в виде черных пятен или полос, явившихся после травления, образовавшихся при длительном нагреве стальных изделий в науглероживающей среде	На канатных изделиях темные пятна науглероживания могут быть от слитков, разлитых под графитосодержащими смесями	
65. <i>Пятна, загрязнения.</i> Дефект поверхности в виде пятен, полос, натеков, разводов, образующихся вследствие прилипания жидкости к изделию и дальнейшего неравномерного окисления при нагреве и травлении металла	К жидкостям, способствующим появлению пятен загрязнения, относятся мазут, технологическая смазка, загрязненное масло и эмульсия	
66. <i>Пятна слипшейся сварки.</i> Дефект поверхности в виде темно-серых участков налипания или отрыва металла, образовавшихся при разматывании слипшихся или сварившихся участков полос рулона, горячекатаных или отожженных холоднокатаных листов в пакетах	На участках пятен слипания сварки изменения микроструктуры не наблюдается	

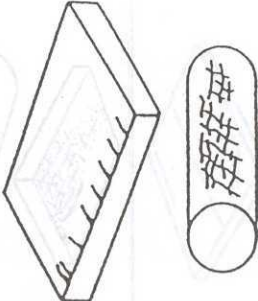
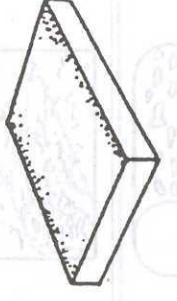
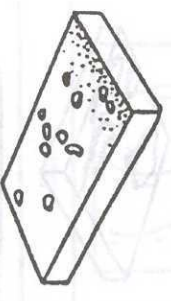

Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>67. <i>Заусенец</i>. Дефект поверхности, представляющий собой острый, в виде гребня, выступ, образовавшийся при резке металла</p>	<p>Заусенец может образовываться при резке металла в горячем и холодном состоянии, а также при рубке горячего металла. Изменения в микроструктуре не происходит. Причина образования заусенцев — неудовлетворительное состояние режущего инструмента</p>	
<p>68. <i>Зазубрины</i>. Дефект поверхности в виде выступов углублений на краях листа и ленты, образовавшихся при нарушении технологии резки или неисправности оборудования</p>	<p>Рваные неровные изломы получаются также при рубке прутков углеродистой или легированной стали с низким содержанием углерода в том случае, если на рубку поступает металл, не полностью охлажденный до комнатной температуры</p>	
<p>69. <i>Торцевая трещина</i>. Дефект поверхности в виде разрывов на торцах и (или) на боковых краях листа и других видов проката, образовавшихся при резке металла тупым или плохо настроенным инструментом, а также в интервале температур синеломкости</p>	<p>Образованию трещин способствует также то, что металл поступает на резку в неотожженном состоянии с высокой твердостью</p>	

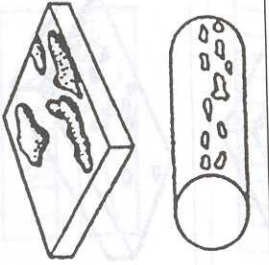


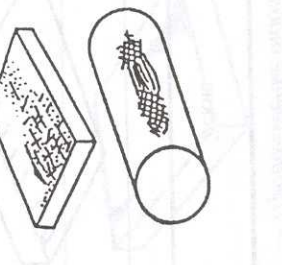
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>70. <i>Полосы-линии скольжения.</i> Дефекты поверхности в виде темных полосок и разветвленных линий на поверхности холоднокатаного листа и ленты, образовавшихся вследствие местных напряжений, превышающих предел текучести металла, вызванных нарушением технологии обработки давлением</p>	<p>Линии скольжения обычно расположены под углом 45° к направлению прокатки и дрессировки</p>	
<p>71. <i>Полосы нагартовки.</i> Дефект поверхности в виде параллельных светлых полос, расположенных поперек направления прокатки</p>	<p>Образуются при повышенной неравномерной деформации, обусловленной автоколебаниями валков</p>	
<p>72. <i>Перегибы.</i> Дефект поверхности листов и лент в виде шероховатых светлых поперечных полос, образовавшихся в результате резких перегибов при сматывании или разматывании рулонов или при изменении формы прогиба пакета листов при подъемно-транспортных операциях</p>	<p>Дефект образуется при неправильной настройке S-образных натяжных устройств, петлевания полос при травлении, из-за наличия серповидности, коробоватости, а также от внутренних напряжений, возникающих в металле при структурных превращениях</p>	
<p>73. <i>Цвета побежалости.</i> Дефект поверхности в виде пятнистой, от желтого до синевато-серого цвета окисной пленки</p>	<p>Образуется на поверхности металла при нарушениях технологии охлаждения после прокатки или при термической обработке, а также при травлении и зачистке дефектов абразивным инструментом</p>	


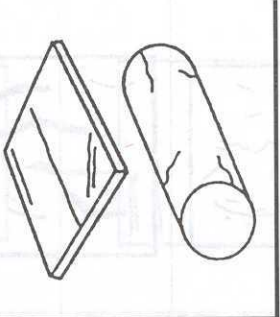
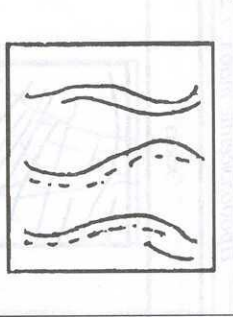
Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p><i>Дефекты поверхности, образовавшиеся при отделочных операциях</i></p> <p>74. <i>Травильные трещины.</i> Дефект поверхности, представляющий собой разрывы, образовавшиеся при травлении металла, имевшего напряжения от структурных превращений или деформации. Могут быть глубокими или мелкими. Травильные трещины иногда образуют поверхностную сетку, подобную сетке шлифовочных трещин, но значительно более грубую</p>	<p>Напряженные закаленные изделия при травлении иногда раскалываются на куски. Причина образования травильных трещин – насыщение напряженного металла водородом, выделяющимся при травлении</p>	
<p>75. <i>Недотрав.</i> Дефект поверхности в виде пятен или полос</p>	<p>Образуются при неполном или неравномерном травлении окалины</p>	
<p>76. <i>Перетрав.</i> Дефект поверхности в виде язв, образовавшихся вследствие длительного травления на отдельных участках или всей поверхности металла</p>	<p>При удалении плотной окалины приходится увеличивать время пребывания металла в ванне, что часто и приводит к перетраву поверхности на участках, с которых окалина сошла раньше</p>	
<p>77. <i>Налет илама.</i> Дефект в виде осадка, образовавшегося на поверхности металла при нарушении технологии травления, очистки и промывки изделия</p>	<p>Шлам состоит из солей оксидов металлов, спеченного галька, а также полимеризированного масла и т.д.</p>	





Продолжение табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>78. <i>Остатки окалины</i>. Дефект поверхности, представляющий собой отдельные участки поверхности, покрытые окалиной, остающиеся после механической обработки</p>	<p>Обычно этот дефект встречается в тех случаях, если травлению подвергается металл с толстым слоем плотной окалины после отжига. Остатки окалины могут наблюдаться также, если при правке плотная окалина после отжига осыпается лишь частично</p>	
<p>79. <i>Пятна ржавчины</i>. Дефект поверхности в виде пятен или полос с рыхлой структурой окисной пленки</p>	<p>Образуются в результате попадания влаги и недостаточной промывки металла от травильных растворов</p>	
<p>80. <i>Оттенки травления</i>. Дефект поверхности в виде чередующихся темных и светлых, матовых и блестящих участков на поверхности</p>	<p>Образуются из-за неравномерного травления высоколегированного или неравномерно наклепанного металла. На поверхности металла окисление и растрав отсутствуют</p>	
<p>81. <i>Шлифовочные трещины</i>. Дефект поверхности в виде сетки паутинообразных или отдельных произвольно направленных поверхностных разрывов, образовавшихся при шлифовании и абразивной зачистке металла, обладающего высокой твердостью, хрупкостью и малой теплопроводимостью. Микроанализ показывает, что шлифовочные трещины очень тонкие, извилистые и распространяются в глубину металла зигзагами или ступеньками с ответвлениями</p>	<p>На микрошлифе в зоне дефекта трещины обычно располагаются по границам зерен. Металл в местах интенсивной шлифовки вследствие разогрева часто бывает покрыт пленкой оксидов, имеющей вид цветов пожелтости</p>	

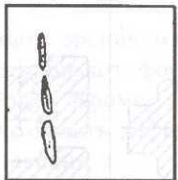


Окончание табл. 7.1

Термины, определения дефектов и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>82. <i>Вмятины</i>. Дефект поверхности в виде произвольно расположенных углублений различной формы, образовавшихся вследствие повреждения и ударов поверхности при транспортировке, правке, складировании и других операциях</p>	<p>Дефект может представлять собой раскаты на бломах или слябах углубления, образовавшиеся от вдавливания острых кернов клещей крана в горячие слитки при их транспортировке</p>	
<p>83. <i>Царапина</i>. Дефект поверхности, представляющий собой углубление неправильной формы и произвольного направления, образующегося в результате механических повреждений, в том числе, при складировании и транспортировании металла</p>	<p>В поперечных микрошлифах дефект имеет тонкое дно, не содержит оксидов, не обезуглерожен и не имеет других изменений микроструктуры</p>	
<p>7.2. Дефекты стальных труб и профилей, образовавшиеся в процессе прессования</p>		
<p>Термины, определения и их морфологические признаки</p>	<p>Генетические признаки дефектов</p>	<p>Эскиз</p>
<p>1. <i>Поперечный рельеф</i>. Дефект представляет собой чередующиеся выступы и впадины, попеременно ориентированные, отстоящие друг от друга на практически равное расстояние, может располагаться как на внутренней, так и на наружной поверхности труб</p>	<p>Причиной образования дефекта является грубая обработка поверхности заготовки</p>	

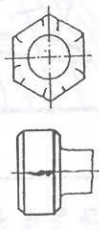
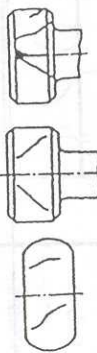
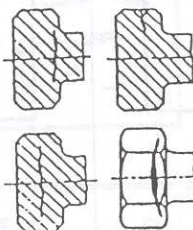
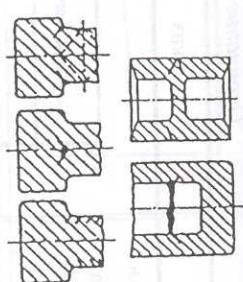
Продолжение табл. 7.2

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>2. <i>Продольный рельеф</i>. Дефект представляет собой чередование углублений и выступов, ориентированных в продольном направлении на поверхности прутков и наружной поверхности труб. Дефект имеет небольшую глубину и распространяется по всему периметру</p>	<p>Дефект присущ крупнозернистым материалам. Образуется в очаге деформации при вдавливании расплавленного слоя стеклосмазки в межзеренные области. При этом крупные зерна на поверхности поворачиваются в направлении главной деформации почти без разрушения</p>	
<p>3. <i>Складчатость переднего конца пресс-изделия</i>. Складчатость, располагающаяся на наружной поверхности переднего конца труб, прутков в виде языкообразных складок и надрывов поперечной ориентации</p>	<p>Причина возникновения дефекта – неправильная подготовка переднего торца заготовки: небольшие размеры фаски, ее неравномерность по периметру</p>	
<p>4. <i>Раковины-вдавы на заднем конце пресс-изделия</i>. Дефект, как правило, группового расположения, представляющий собой углубление поперечной ориентации, распространяющийся только на одной его стороне по всему периметру, вдоль образующей</p>	<p>Причиной образования дефекта является избыток стеклосмазки на наружной поверхности заготовки, которая по мере прессования выдавливается и скапливается на заднем конце заготовки. В последний момент прессования смазка проходит через очко матрицы и вдавливается в поверхность прутка или прутка</p>	
<p>5. <i>Риски со вдавом</i>. Это дефект, представляющий собой либо прямолинейно расположенные риски, заканчивающиеся вдавом, либо только вдавы, располагающиеся на наружной стороне, или внутренней поверхности пресс-изделий. Могут носить групповой или единичный характер</p>	<p>Чаще всего образуется вследствие вдавливания в поверхность заготовки или изделия крупных кусков стеклосмазки, частиц тугоплавких примесей, окислы, присутствующих в смазке</p>	

Окончание табл. 7.2

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>6. <i>Впрессованные металлические частицы.</i> Дефект поверхности пресс-изделий в виде вырывов и внедрении кусочков металла, как правило, имеющих рваную крошку. Иногда дефект вытянут и сопровождается рисками</p>	<p>Основная причина образования дефекта – скопление металла в "мертвой" зоне очага деформации с последующим втягиванием в матрицу и вдавливанием в пресс-изделие</p>	
<p>7. <i>Продольная складчатость.</i> Это дефект преимущественно наружной поверхности пресс-изделия, имеющий примерно одинаковую глубину по длине, образующийся при наличии на переднем конце заготовки или боковой ее поверхности выступов или углублений острой формы и усов</p>	<p>Полость дефекта может иметь трещины, отчатки стекломассы и науглероживаться при использовании углесодержащих смазок</p>	
<p>8. <i>Внутренние рванины в прутках.</i> Дефект представляет собой равномерно чередующиеся разрывы металла в осевой зоне прутка, причем одна сторона образовавшейся в результате разрыва металла полости напоминает по форме пресс-утяжину и направлена в сторону истечения металла</p>	<p>Дефект возникает при прессовании прутков из малоэластичных сталей и сплавов под действием растягивающих напряжений в случае недостаточной пластичности металла в осевой зоне заготовки. Частичной причиной этого может быть недогрев металла в центре заготовки</p>	

7.3. Дефекты холодной штамповки

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>1. <i>Продольные трещины.</i> Это дефекты, образовавшиеся в направлении силового воздействия на штамп</p>	<p>Основная причина возникновения — поверхностные дефекты исходного материала. Часто возникают в месте ликвации и выходят на наружную поверхность</p>	
<p>2. <i>Скалывание трещины.</i> Это трещины, которые имеют характерное, для действия максимальных напряжений, при сдвиге расположение под углом 45° к направлению силы деформирования</p>	<p>Такие трещины возникают в недостаточно пластичных материалах или в случае превышения допустимой деформации, а также вследствие наличия поверхностных дефектов исходной заготовки. Поэтому они обычно появляются вместе с продольными трещинами</p>	
<p>3. <i>Поперечные трещины.</i> Это трещины, возникающие под углом 90° к направлению силы деформирования. Проявляются в виде складкообразований или возникают внутри штамповки</p>	<p>Часто вызваны неправильным построением технологического процесса и могут возникать при старении материала в местах наибольших местных деформаций</p>	
<p>4. <i>Разрывы от деформации.</i> Такие дефекты могут возникнуть при прямом, обратном и двустороннем выдавливании</p>	<p>Дефектам этого вида подвержены трудно деформируемые сплавы при неправильном построении технологического процесса (выбора переходов, схемы течения металла, допустимые по переходам деформации)</p>	

7.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМ ОПТИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

Посредством зрения мы имеем возможность воспринимать форму, цвет, яркость, движение. Кроме того, человек способен распознавать дефекты и причины их возникновения.

Однако органолептический визуальный контроль имеет ряд недостатков.

При наличии отвлекающих факторов контролер может проглядеть дефектные участки изделия. Очень высокие требования к производительности и качеству изделий металлургической промышленности превышают возможности людей – визуальных контролеров.

Поэтому на современных металлургических предприятиях органолептический визуальный контроль заменяют автоматизированным оптическим контролем.

Системы такого контроля включают источники света, сенсоры, элементы оптики, средства обработки сигналов и программное обеспечение.

В качестве источников света используют галогенные, ртутные и люминесцентные лампы и лазеры. Сенсоры – это, как правило: вакуумные телевизионные камеры, твердотельные устройства получения изображения, фотоэлектронные умножители и кремниевые полупроводники. Люминесцентные лампы используют совместно с твердотельными устройствами, например, с приборами с зарядовой связью (ПЗС). Лазерные источники часто работают совместно с кремниевыми полупроводниками и фотоэлектрическими устройствами (ФЭУ).

Как уже отмечалось, лазерные источники обладают такими уникальными свойствами, как: огромной концентрацией мощности излучения на поверхности ОК (до примерно 10^{11} Вт/см² в непрерывном режиме); высокой когерентностью в пространстве и времени. Последнее свойство позволяет при отражении лазерного пучка света от поверхности ОК формировать на

экране дифракционный образ облучаемой поверхности, по виду которого можно делать заключение о наличии на поверхности ОК рисок, царапин и т.п.

В автоматизированных системах в качестве элементов оптики широко используют вращающиеся (вибрирующие) многоугольные зеркала, параболические зеркала.

С целью классификации дефектов по анализу комбинаций параметров отраженного от ОК излучения в рассматриваемых системах обычно используют как аналоговые методы пространственной фильтрации отраженного от ОК излучения, так и цифровые фильтры.

Черновой поверхности, свободной от дефектов, свойственна определенная угловая плотность распределения силы света рассеянного излучения, причем вид этого распределения примерно одинаков для всех участков бездефектной поверхности. Дефекты поверхности локально изменяют вид этого распределения (рис. 7.3). Наличие некоторых дефектов может локально увеличить поглощение падающего на них излучения.

Например, царапины на поверхности ОК могут вызывать дифракционное рассеяние, а наличие чужеродного материала – уменьшить интенсивности отраженной поверхности пучка излучения.

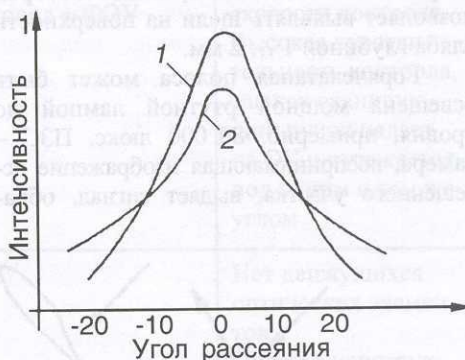


Рис. 7.3. Угловое распределение плотности рассеяния света:

- 1 – бездефектная поверхность;
- 2 – поверхность с царапиной

Так, например, пространственный фильтр с различной по сечению прозрачностью может ослаблять большую часть лучистого потока, отраженного от бездефектной поверхности, а пучки излучения, отраженные от дефектов, пропускать на приемник. Такие фильтры также позволяют, например, подавлять пучки, имеющие одни распределения силы света направленно-рассеянного излучения и пропускают пучки, отраженные от дефектов с другим распределением силы света.

Ниже описано несколько физических принципов, на основе которых строятся системы автоматизированного оптического контроля в металлургической промышленности.

Горячая поверхность слывов, фасонного проката, толстолистовой стали генерируют излучение, интенсивность которого промодулирована находящимися на поверхности дефектами.

Сенсоры (ПЗС камеры) воспринимают промодулированное дефектами излучение и вырабатывают электрические сигналы, которые затем обрабатываются в специальных процессорах. С помощью этого принципа можно обнаружить дефекты поверхности шириной более 0,5 мм.

Поверхность горячего слыва может сканироваться микрофокусным инфракрасным пирометром, который выдает информацию о локальном распределении энергии по длинам волн, анализ которой позволяет выявлять щели на поверхности слыва глубиной 1 ... 2 мм.

Горячекатаная полоса может быть освещена мощной ртутной лампой до уровня, примерно, 80 000 люкс. ПЗС – камера, воспринимающая изображение освещенного участка, выдает сигнал, обра-

батываемый в миникомпьютере. При использовании этого принципа системой выявляются черные пятна размером 2 мм при скорости контроля 1500 м/мин и температуре полосы около 700 °С.

Существует ряд закономерностей отражения света от поверхностей объектов контроля.

В зависимости от соотношений между длиной волны падающего на ОК света и размерами неровностей его поверхности свет отражается от ОК по-разному:

1. Если размеры неровностей поверхности намного меньше, чем длина волны падающего на эту поверхность лучистого потока, то последний отражается поверхностью зеркально.

2. Если же размеры неровностей того же порядка, что и длина волны падающего излучения, то в рассеянии главную роль играют дифракционные эффекты.

3. В том случае, когда указанные выше неровности намного больше длины волны излучения, то оно зеркально рассеивается на неровностях (рис. 7.4).

Один из методов дефектоскопии состоит в покрытии поверхности ОК равномерной смазкой, например, антикоррозионной, освещение ОК прозрачным для смазки излучением, например, в ИК диапазоне ($\lambda \approx 4 \dots 6$ мкм) и анализе локальной интенсивности отраженного света. На участках, где имеются дефекты, толщина смазки отличается от средней, что приводит к локальному изменению интенсивности отраженного света, и детектор с пороговым устройством может зарегистрировать указанное выше изменение интенсивности.

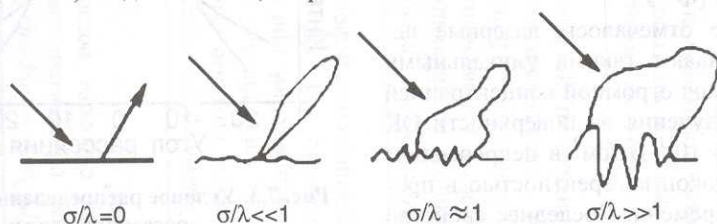


Рис. 7.4. Диаграммы рассеяния излучения на поверхности:

σ – среднеквадратическая высота выступов микрорельефа; λ – длина волны излучения

При дефектоскопии металлургической продукции часто используется фотографический контроль, при выполнении которого ОК несколько раз фотографируется, пленка быстро проявляется и изображение, зафиксированное пленкой, проектируется на экран и анализируется оператором. Этим методом можно обнаружить дефекты с шириной раскрытия более 0,4 мм.

Краткое описание систем автоматической оптической дефектоскопии горячих слябов, крупногабаритных прокатных стальных изделий и горячекатаных полос приведено выше; в табл. 7.4 представлены состав и качественные характеристики систем автоматической оптической дефектоскопии холоднокатаного проката.

7.4. Состав и качественные характеристики систем автоматической оптической дефектоскопии поверхностей холодного проката

Метод сканирования	Источник света	Система оптики и датчиков	Характеристики
Угловое сканирование движущимся пучком света	Галогенная лампа	Кремниевый полупроводник	Выявляют мелкие дефекты
	Лазер, например, гелий-неоновый	Пространственный фильтр + волоконная оптика + многоугловое зеркало + ФЭУ	Нет ограничений по скорости контроля при использовании многоугольного зеркала. Сложная оптическая система
		Оптическое волокно + ФЭУ	—
Параллельное сканирование		Многоугловое зеркало + параболическое зеркало + оптический световод + ФЭУ	Выявляются мелкие дефекты. Нет ограничений по скорости контроля. Высокая чувствительность контроля, так как сканирующий пучок падает на ОК и отражается под одним и тем же углом
Сканирование движущегося изображения	Удлиненный источник света, например, люминесцентная лампа	ПЗС	Нет движущихся оптических элементов. Простая конструкция. Не гарантируется выявление трещин

7.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ ПРИ ГОРЯЧЕЙ И ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ПРОИЗВОДСТВА

Выбор рациональных средств контроля для регулирования толщины полосы на прокатных станах осуществляется на основе требований, обусловленных конструктивными и технологическими условиями процесса прокатки. Вот их неполный перечень:

- 1) диапазон измерений толщины;
- 2) точность измерения контролируемой толщины;
- 3) требуемое быстродействие.

Диапазон измерения толщины должен охватывать все значения контролируемой толщины от минимально возможной до максимальной для данной клетки. Кроме того, с точки зрения однотипности эксплуатируемого оборудования, взаимозаменяемости узлов при ремонте, желательно устанавливать однотипные измерители толщины в линии непрерывного стана.

Необходимая точность измерения определяется из условия удовлетворения самых жестких требований стандарта на отклонение контролируемой толщины. Обычно принимают достаточным пятикратный запас по точности измерительного прибора по сравнению с полем допусков по стандартам. Поскольку поле допусков по стандарту на отклонение толщины листового металла в основном укладывается в диапазон от 3 до 5 % от номинала, то допустимой погрешностью измерения толщины можно считать 0,6 ... 1 %.

Для определения требуемого быстродействия средств контроля толщины

необходимо провести статистический анализ частот и амплитуд колебаний контролируемого параметра при естественном протекании процесса прокатки.

В настоящее время для контроля толщины листового проката в процессе производства в мировой практике используются следующие методы: контактный, оптический, радиоволновой, электромагнитный, ультразвуковой, радиационный. Каждый из них обладает определенными преимуществами и недостатками и предназначен для контроля толщины в определенных интервалах и условиях измерений. Остановимся на существенных признаках, присущих каждому методу контроля.

В приборах контактного типа измерения производятся при соприкосновении измерительных элементов с поверхностью проката. При этом объект контроля может перемещаться или быть неподвижным относительно измерительных элементов. Конструкция всех *контактных* устройств для измерения толщины не зависит от химического состава прокатываемого металла.

Контактные толщиномеры имеют ряд недостатков, ограничивающих их широкое применение. Так как измерительные элементы контактируют с движущейся полосой, то при скоростях выше 10 м/с возникают колебания в приборе. Этот процесс может усугубляться, если полоса не плоская. Наблюдается также быстрый износ измерительных элементов, что требует их частой проверки. При работе контактных толщиномеров не учитывается тепловое расширение измерительных элементов. Преимуществами данного типа приборов являются простота и безопасность обслуживающего персонала.

Контактные толщиномеры используются при скоростях прокатки до 5 м/с или перед первой клетью непрерывного стана. Их применяют также для калибровки толщиномеров других типов.

При бесконтактном измерении толщины процесс измерения значительно усложняется.

Некоторыми измерительными устройствами фиксируется возникающее под действием вихревых токов индукционное напряжение, значение которого зависит от толщины полосы, электропроводности и магнитной проницаемости. Поэтому результаты измерения нельзя считать вполне точными. Такой способ применяется для немагнитных материалов.

Оптические системы контроля обеспечивают стабильность выходного сигнала в широком диапазоне перемещения полосы. Такие измерители применяются при очень быстрых перемещениях и сильных вибрациях контролируемой полосы.

Ультразвуковой измеритель толщины позволяет получать данные об ее изменении во время прокатки полосы с высокой точностью. Быстродействие таких толщиномеров зависит от контролируемой толщины проката.

В радиоволновых измерителях толщины по известной скорости распространения микроволновых колебаний можно определить время прохождения микроволнового сигнала от источника до детектора. Это время будет соответственно возрастать или уменьшаться при уменьшении или увеличении толщины контролируемого материала, так как общая длина пути микроволнового сигнала при уменьшении толщины будет уменьшаться, а при увеличении толщины — увеличиваться. Такой метод обеспечивает точ-

ное измерение полосы только в том случае, если одновременно поступающие сигналы детектора будут совпадать по фазе с сигналами источника.

В радиационных толщиномерах показания зависят от толщины полосы, ее плотности и химсостава. Незначительные отклонения в химическом составе измеряемого материала влияют на показания толщиномера. В этих устройствах существует зависимость интенсивности излучения от толщины полосы. Причем эта зависимость является нелинейной.

Радиоизотопные толщиномеры пригодны для применения в качестве измерителя толщины на автоматизированном прокатном стане. Такие толщиномеры позволяют с достаточной точностью измерять и контролировать толщину раската, но ограничены по быстродействию и невозможности одним и тем же источником радиоизотопного излучения контролировать сильно различающиеся толщины. К тому же, в настоящее время остро стоит проблема захоронения радиоактивных источников.

Рентгеновские толщиномеры нашли широкое применение на непрерывных станах за счет более высокого быстродействия и большего зазора измерительного преобразователя при прохождении контролируемой полосы по сравнению с радиоизотопными.

Совместное рассмотрение технологий прокатного производства, требуемых точностей проката, возможностей различных методов толщинометрии и стабилизирующих факторов прокатного производства показывает, что наиболее универсальным и эффективным является рентгеновский метод (табл. 7.5).

7.5. Области применения методов измерения толщины листового проката в процессе производства

Метод	Возможность контроля						Зависимость от температуры и химического состава
	при холодной прокатке	при горячей прокатке	с погрешностью до 1 %	при скорости более 20 м/с	при наличии большого зазора	при наличии паров	
Контактный	+	-	+	-	+	+	+
Оптический	-	+	-	+	-	+	+
Радиоволновой	-	+	-	+	-	+	+
Магнитный	+	-	+	+	-	+	+
Электромагнитный	+	-	-	-	-	+	-
Ультразвуковой	+	-	+	+	+	+	-
Радиоизотопный	+	+	-	-	-	+	+
Рентгеновский	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. "+" – возможно применение; "-" – применение ограничено.

Контактный толщиномер обычно состоит из трех основных узлов (рис. 7.5): основания, узла базирования и узла контроля. Основание 1 выполнено в виде скобы. Узел базирования состоит из двух горизонтальных верхних роликов 2, жестко укрепленных на основании в направлении движущейся полосы, двух нажимных горизонтальных роликов 3, которые при помощи пружины соединены с основанием и установлены поперек движения полосы, двух вертикальных роликов 4, также укрепленных на основании.

В узел контроля толщины входят два измерительных ролика 5. Для проведения измерений толщиномер заводится сбоку на полосу до упора ее края о вертикальные ролики 4. Прибор опирается на полосу верхними роликами 2, а подпружиненные нижние ролики 3 зажимают полосу. Измерительные ролики 5 постоянно контактируют с полосой.

Принципиальная схема действия простейшего оптического толщиномера показана на рис. 7.6.

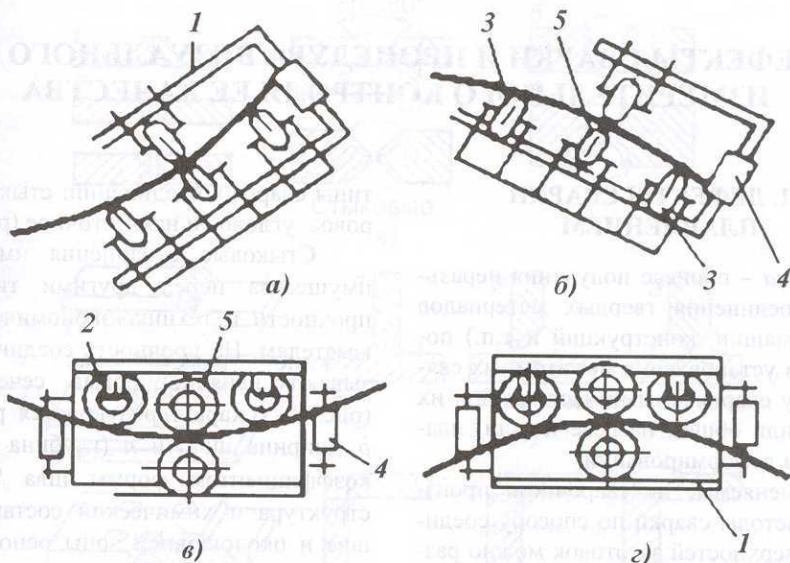


Рис. 7.5. Измерение толщины:

а – вогнутой коробчатой полосы; *б* – выпуклой коробчатой полосы; *в* – вогнутой полосы (при продольной вогнутости); *г* – выпуклой полосы (при продольной выпуклости)

Поток лучей от источника излучения *И* попадает на расщепитель *Б*, который делит его на два равных пучка. Один из пучков отражается зеркалом *М1* на направляющий ролик *М2*, другой – подвижным зеркалом *М3* – на измеряемую полосу *М4*. Лучи, отраженные от направляющего ролика и поверхности полосы, направляются зеркалами *М1* и *М3* на фотодетектор *Ф*, где преобразуются в электрический сигнал. Если пути *БМ1М2* и *БМ3М4* одинаковы, то лучи, падающие на фотодетектор *Ф*, находятся в одинаковой фазе при любой длине волны излучения, и выходной сигнал детектора максимален.

В данном измерительном устройстве зеркало *М3* совершает непрерывное возвратно-поступательное движение, сканируя тем самым возможный диапазон значений толщины полосы. Измеряя выходной сигнал фотодетектора и определяя положение зеркала *М3* в этот момент, можно найти толщину измеряемой полосы. Источник *И*, используемый в приборе, должен излучать энергию в широком диа-

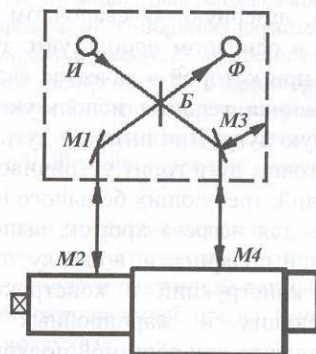


Рис. 7.6. Принципиальная схема действия оптического толщиномера "Тетраметр"

пазоне волн. Погрешность прибора составляет $\pm 0,25$ мм. Однако парообразование и запыленность воздуха увеличивают погрешность измерения такого оптического толщиномера, что ограничивает его применение.

Ультразвуковые, радиоизотопные и рентгеновские толщиномеры достаточно подробно описаны в литературе [3].

ДЕФЕКТЫ СВАРКИ И ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЕЕ КАЧЕСТВА

8.1. ДЕФЕКТЫ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Сварка – процесс получения неразъемного соединения твердых материалов (деталей машин, конструкций и т.п.) посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве и (или) пластическом деформировании.

Применяемые в сварочном производстве методы сварки по способу соединения поверхностей заготовок можно разделить на метод сварки плавлением и метод сварки давлением.

К сварке плавлением относят электродуговую, электрошлаковую, газовую, электронно-лучевую, плазменную, термитную, лазерную. В сварочном производстве в основном используют дуговую сварку, при которой в качестве сварочного источника теплоты используют электрическую дугу. При питании дуги постоянным током дуга горит устойчиво. Сварку изделий, требующих большого подвода теплоты для нагрева кромок, выполняют на прямой полярности, а сварку тонколистовых конструкций и конструкций из нержавеющей и жаропрочных сталей осуществляют при обратной полярности – плюсовая клемма присоединена к электроду, а минусовая – к детали.

Процесс образования сварного соединения плавлением протекает в две стадии:

1) расплавление кромок металла деталей (заготовок), сопровождающееся образованием общего объема жидкого металла;

2) затвердевание этого объема металла.

При изготовлении сварных конструкций широко применяют следующие

типы сварных соединений: стыковое, тавровое, угловое и нахлесточное (рис. 8.1).

Стыковые соединения имеют преимущества перед другими типами по прочности и технико-экономическим показателям. На прочность соединения оказывают влияние форма сечения шва (рис. 8.2), характеризующаяся размерами b (ширина шва) и h (глубина шва) или коэффициентом формы шва $\Psi = b/h$, структура и химический состав металла шва и околошовной зоны основного металла. Шов, соединяющий элементы стыкового соединения, называют *стыковым*, а таврового нахлесточного или таврового – *угловым*.

В зависимости от числа проходов (слоев), необходимых для получения расчетного сечения шва, различают *однопроходный* (однослойный) и *многопроходный* (многослойный) стыковой и угловой швы. Шов, соединяющий заготовки по всей их длине, называют *непрерывным*, шов, где сваренные участки чередуются с несваренными, называют *прерывистым*.

Перед сваркой элементы конструкций подвергают соответствующей подготовке. Виды подготовки зависят от материала конструкции, его толщины, а также технологических особенностей свариваемого изделия. Основными параметрами подготовки кромок являются угол раскрытия, величина притупления и зазор.

В настоящее время в промышленности распространены следующие способы дуговой сварки:

– *ручная*, при которой человек выполняет сварку с помощью инструмента, получающего энергию от специального источника;

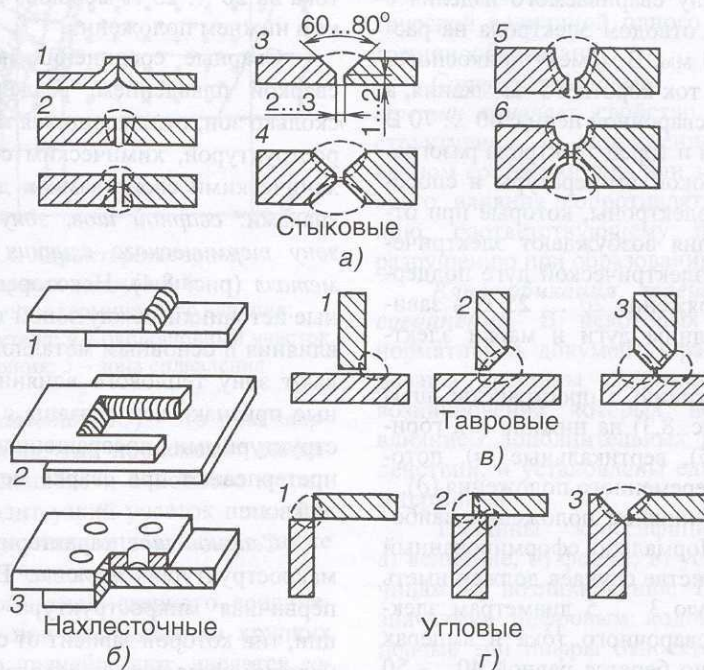


Рис. 8.1. Типы сварных соединений:

а – стыковые: 1 – отбортовочные; 2 – без разделки кромок; 3 – V-образная разделка кромок; 4 – X-образная разделка кромок; 5 – U-образная разделка кромок; 6 – U-образная двухсторонняя разделка кромок; **б – нахлесточные:** 1 – с односторонним лобовым швом; 2 – прорезное с односторонним лобовым и фланговыми швами; 3 – заклепочное; **в – тавровые:** 1 – с односторонним фланговым швом; 2 – то же, с односторонней разделкой кромки; 3 – с двухсторонним фланговым швом и двухсторонней разделкой кромок; **г – угловые:** 1 – с односторонним фланговым швом; 2 – то же, с двухсторонними фланговыми швами; 3 – с V-образной разделкой кромок

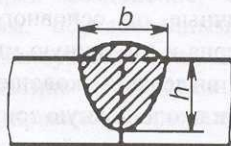


Рис. 8.2. Схема зоны проплавления стыкового соединения

– *механизированная*, выполняемая с применением машин и механизмов, управляемых человеком;

– *автоматическая*, выполняемая машиной, действующей по заданной программе, без непосредственного участия человека.

При ручной сварке используют электроды с тонким, средним, толстым и особо толстым покрытиями.

Тонкое покрытие повышает устойчивость горения дуги, но не защищает металл электрода и сварочной ванны от воздействия окружающей среды (кислорода и азота воздуха).

При сварке электродами со средним, толстым и особо толстым покрытиями создается газшлаковая защита и ее используют в производстве ответственных конструкций.

Ручную электродугую сварку можно осуществлять металлическим (плавящимся) электродом, угольным электродом без защиты, а также угольным или вольфрамовым электродами в среде защитных газов.

Зажигание дуги производят кратковременным прикосновением конца элект-

трода к металлу свариваемого изделия с последующим отводом электрода на расстояние 3 ... 4 мм. В момент прикосновения возникает ток короткого замыкания, а напряжение в сварочной цепи с 60 ... 70 В падает до нуля и торец электрода разогревается до высокой температуры и способен излучать электроны, которые при отрыве от изделия возбуждают электрическую дугу. В электрической дуге поддерживается напряжение 20 ... 25 В в зависимости от длины дуги и марки электрода.

По положению в пространстве швы разделяют (рис. 8.3) на нижние (а), горизонтальные (б), вертикальные (в), потолочные (г) и переменного положения (д).

Сварка в нижнем положении наиболее удобна. Нормально сформированный шов в большинстве случаев должен иметь ширину, равную 3 ... 5 диаметрам электрода. Сила сварочного тока в амперах ориентировочно берется равной 40 ... 50 диаметрам электрода. Вертикальные швы могут выполняться способом снизу вверх и способом сверху вниз. Сварка снизу вверх более удобна. Сварку вертикальных швов производят короткой дугой с незначительными поперечными колебаниями электрода. Сварочный ток берется на 15 ... 20 % меньше, чем при сварке в нижнем положении. Горизонтальные швы выполнять труднее вертикальных. Варить потолочные швы наиболее трудно и они выполняются при минимально допустимой длине дуги с величиной сварочного

тока на 20 ... 25 % меньше, чем при сварке в нижнем положении.

Сварные соединения, выполненные сваркой плавлением, разделяют на несколько зон, отличающихся макро- и микроструктурой, химическим составом, механическими свойствами и другими признаками: *сварной шов, зону сплавления, зону термического влияния и основной металл* (рис. 8.4). Некоторые литературные источники между зоной термического влияния и основным металлом рассматривают зону теплового влияния. Характерные признаки зон связаны с фазовыми и структурными превращениями, которые претерпевают при сварке металла в каждой зоне.

Сварной шов характеризуется литой макроструктурой металла. Ему присуща первичная микроструктура кристаллизации, тип которой зависит от состава шва и условий фазового перехода из жидкого состояния в твердое.

Зона термического влияния (ЗТВ) – участок основного металла, примыкающий к сварному шву, в пределах которого вследствие теплового воздействия сварочного источника нагрева протекают фазовые и структурные превращения в твердом металле. В результате этого ЗТВ имеет отличные от основного металла величину зерна и вторичную микроструктуру. Часто выделяют околошовный участок ЗТВ или околошовную зону (ОШЗ).

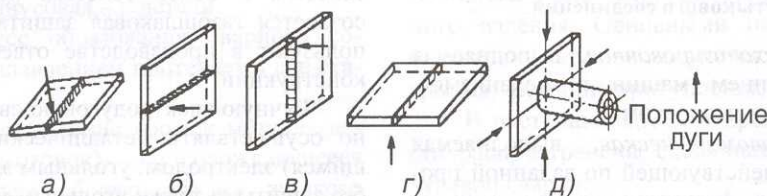


Рис. 8.3. Схема пространственного положения сварных швов:

а – нижнее; б – горизонтальное; в – вертикальное; г – потолочное; д – переменное

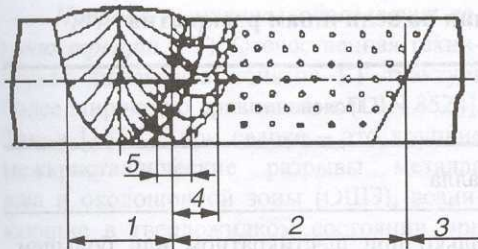


Рис. 8.4. Характерные зоны сварных соединений:

- 1 - шов; 2 - зона термического влияния;
3 - основной металл; 4 - околошовный участок зоны влияния; 5 - зона сплавления

Зона сплавления (ЗС) - это зона сварного соединения, где происходит сплавление наплавленного и основного металла. В нее входит узкий участок шва, расположенный у линии сплавления, а также оплавленный участок ОШЗ.

Четвертой зоной сварного соединения, которой при исследовании хрупких трещин часто пренебрегают, является зона теплового влияния, для нее характерны заметные изменения микроструктуры.

Основной металл (ОМ) располагается за пределами ЗТВ и не претерпевает изменений при сварке.

Свариваемость и ее показатели. Свариваемость - это свойство металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией или эксплуатацией изделия.

В практике исследований свариваемости, как правило, придерживаются следующих понятий и терминов.

Склонность к образованию трещин как показатель свариваемости материала, который устанавливается по факту образования трещин в сварном соединении и оценивается качественно или количественно критической величиной из факторов, обуславливающих трещинообразование.

Стойкость против образования трещин как показатель свариваемости материала, который устанавливается по факту отсутствия трещин и оценивается

качественно или количественно подкритической величиной одного из факторов трещинообразования.

Спротивляемость образованию трещин означает свойство материала в структурном и напряженно-деформированном состоянии шва или зоны термического влияния сопротивляться разрушению, соответствующему по характеру разрушению при образовании трещин.

Классификация трещин сварных соединений. В некоторых зарубежных нормативных документах расклассифицированы трещины сварных соединений, возникновение которых не связано с влиянием дополнительных внешних воздействий, и установлены единые понятия и термины.

Трещины классифицируются по: а) величине, б) форме, в) условию и причинам их возникновения. Трещины обозначаются цифровым кодом, в котором первые три цифры относятся к трещине вообще, четвертая - к величине ее раскрытия, пятая - к характеру ее размещения относительно границ зерен металла, шестая и седьмая цифры кодируют условия и причины возникновения трещин. Используя такой код, можно, например, записать:

100 - трещина;

1001 - микротрещина;

10011 - межкристаллитная микротрещина;

1001110 - межкристаллитная горячая микротрещина.

По условиям возникновения как отечественная, так и зарубежная техническая литература трещины классифицирует на две большие группы - на горячие (ГТ) и холодные (ХТ). Большинство зарубежных нормативных документов (чтобы не зависеть от элементного состава материала и изделия) понятие "горячая трещина" относят к агрегатному состоянию (фазе) "жидкость", а не к температуре.

Ниже в виде табл. 8.1, 8.2 и 8.3 приведена кодовая классификация трещин сварных соединений, заимствованная из DIN 8524, часть 3.

8.1. Кодовая классификация трещин по величинам раскрытия

Кодовое обозначение	Термин	Пояснение
100	трещина	разрыв металла
1001	микротрещина	видимая только при шестикратном или большем увеличении*
1002	макротрещина	видна нормальным глазом с расстояния 250 мм или при увеличении ниже шестикратного

* В соответствии с ГОСТ 2601–84 (в ред. 1993 г.) микротрещина – это трещина сварного соединения, обнаруженная при пятидесятикратном и более увеличении.

8.2. Кодовая классификация трещин по характеру их расположения относительно границ зерен металла

Кодовое обозначение	Термин	Пояснение
10001	интеркристаллическая трещина (трещина по границам зерен)	проходит вдоль границ кристаллитов
10002	транскристаллическая трещина	проходит через кристаллиты
10003	меж- и транскристаллическая трещина	проходит по границам кристаллитов и через кристаллиты

8.3. Кодовая классификация трещин по условиям и причинам их возникновения

Кодовое обозначение	Термин	Пояснение
1000010	горячая трещина	возникает по легкоплавкой фазе, когда она в жидком состоянии
1000011	кристаллизационная трещина	возникает во время кристаллизации сварочной ванны
1000012	полигонизационная* трещина	только легкоплавкая фаза, например, по границам зерен, расплавлена

*Области зерен, отделенные малоугловыми границами, представляющие собой кристаллические блоки или полигон (отсюда и термин – полигонизация).

Природа и причины образования горячих трещин (ГТ). Отечественная техническая литература понятие ГТ трактует более широко по сравнению с [DIN 8524]. Так, в [16] ГТ при сварке – это хрупкие межкристаллические разрывы металла шва и околошовной зоны (ОШЗ), возникающие в твердожидком состоянии при завершении кристаллизации, а также в твердом состоянии при высоких температурах на этапе преимущественного развития межзеренной деформации. ГТ могут возникать в сварных соединениях конструкционных сплавов при всех способах сварки плавлением.

Топография ГТ представлена на рис. 8.5.

Необходимым условием и первой причиной образования ГТ является наличие температурно-временных интервалов хрупкости (ТИХ) неравновесно кристаллизующихся сплавов.

Модель структуры сварного шва в этих интервалах приведена на рис. 8.6.

Вторая причина возникновения ГТ – высокотемпературные деформации, раз-

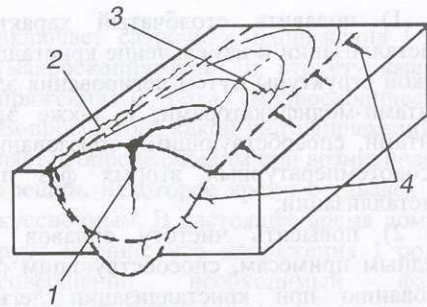


Рис. 8.5. Топография горячих трещин в сварных соединениях:

1–2 – продольные в шве и околошовной зоне;
3–4 – поперечные в шве и околошовной зоне

вивающиеся вследствие затрудненной усадки металла шва и формоизменения свариваемых заготовок, а также при релаксации сварочных напряжений в неравновесных условиях сварки и при послесварочной термообработке, усиленные температурной, структурной и механической концентрацией деформаций.

Для предотвращения ГТ или улучшения свариваемости необходимо:

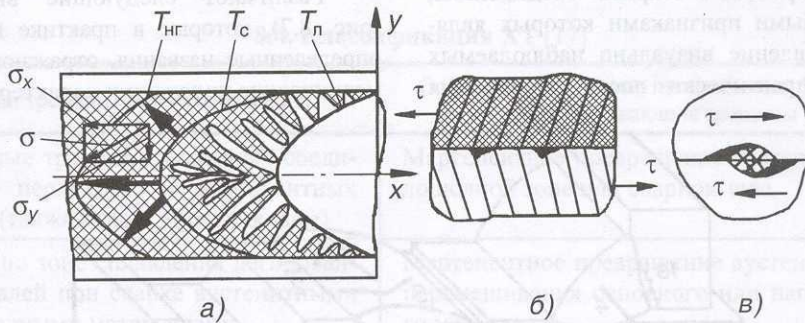


Рис. 8.6. Модель структуры сварного шва и схемы зарождения ГТ кристаллизационного (а) и подсолидусного (б, в) типа:

а – поворот кристаллитов под действием усадочных напряжений до заклинивания, что ограничивает залечивание расплавом раскрывающихся трещин; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma$ – внутренние нормальные напряжения; $T_{нг}, T_c, T_l$ – соответственно нижняя граница ТИХ, температуры солидуса и ликвидуса; б – ростовые дислокации у границ зерен; τ – внутренние касательные напряжения; в – зарождение трещины при межзеренном проскальзывании в месте выхода ростовых дислокаций и в местах залегания карбидов и интерметаллидов

1) подавить столбчатый характер кристаллизации и измельчение кристаллической структуры путем легирования элементами-модификаторами, а также элементами, способствующими образованию высокотемпературных вторых фаз при кристаллизации;

2) повысить чистоту сплавов по вредным примесям, способствующим образованию при кристаллизации легкоплавких фаз в той области составов, в которой увеличение количества этих фаз снижает технологическую прочность, и, наоборот, увеличить количество легирующих элементов, образующих эвтектики, в области составов сплавов, близких к эвтектическим. Оба эти пути ведут к сужению температурного интервала хрупкости и повышению запаса пластичности.

Технологические меры борьбы с трещинами обычно направлены на изыскание способов и режимов сварки плавлением и конструктивных форм сварных соединений, снижающих темп нарастания внутренних деформаций в процессе затвердевания.

Природа и причины образования холодных трещин (ХТ). ХТ объединяют категорию трещин в сварных соединениях, формальными признаками которых являются появление визуально наблюдаемых трещин практически после охлаждения

соединения; блестящий кристаллический излом трещин без следов высокотемпературного окисления. ХТ – локальные хрупкие разрушения материала сварного соединения, возникающие под действием собственных сварочных напряжений. Размеры ХТ соизмеримы с размерами зон сварного соединения. Локальность разрушения объясняется частичным снятием напряжений при образовании трещин, а также ограниченностью зон сварного соединения, в которых возможно развитие трещин без дополнительного притока энергии от внешних нагрузок.

Существующие классификации ХТ в основном связаны с их расположением в сварном соединении. Образование ХТ возможно во всех зонах сварного соединения: в ЗТВ, шве и зоне сплавления. Трещины обычно ориентированы приблизительно параллельно или перпендикулярно оси шва, видимо, это связано с направлением главных компонент сварочных напряжений. Конфигурация трещин в основном определяется очертанием линии сплавления, а иногда также макроструктурами основного металла и шва.

Различают следующие виды ХТ (рис. 8.7), которые в практике получили определенные названия, отражающие геометрические признаки и характер излома.

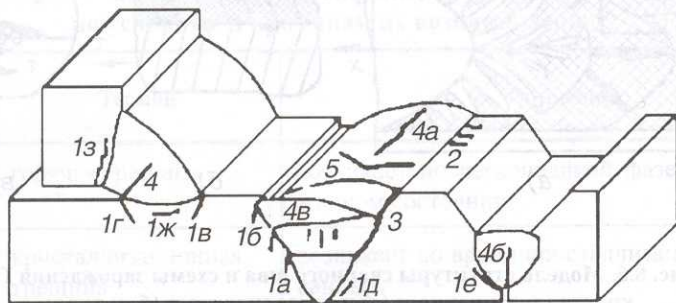


Рис. 8.7. Топография холодных трещин:

1 – продольные в ЗТВ (*a-e* – отколы; *z-e* – корневые; *б, г, e* – от концентратора; *ж* – подвалковые; *з* – слоистое растрескивание или ламелярные; 2 – поперечные в ЗТВ (частокол); 3 – продольные в ЗС (отрыв или отслаивание); 4 – продольные в шве (*a* – поверхностные; *б* – корневые; *в* – внутренние); 5 – поперечные в шве (поверхностные, корневые, внутренние)

Образование ХТ начинается с возникновения очага разрушения, как правило, на границах зерен на околошовном участке ЗТВ, примыкающих к линии сплавления. Протяженность очагов трещин составляет несколько диаметров аустенитных зерен. При этом разрушение не сопровождается заметной пластической деформацией и наблюдается как практически хрупкое. Это позволяет отнести ХТ к межкристаллическому хрупкому разрушению. Дальнейшее развитие очага в микро- и макротрещину может носить смешанный или внутризеренный характер.

Первая и основная причина образования ХТ связана с изменением структуры металла в результате сварки по сравнению со структурой металла в состоянии поставки или в других состояниях, при которых металл не склонен к трещинам.

Вторым фактором, способствующим образованию ХТ в сталях при сварке, является водород, которым насыщается металл сварного соединения из атмосферы сварочной дуги и основного металла в результате термодиффузии.

Фактор напряжений – третье необходимое условие для образования ХТ. Он

включает сварочные напряжения I рода (макроскопические) и структурные напряжения II рода (микроскопические). Вопрос о том, какой вид напряжений является определяющим при возникновении трещин, некоторое время оставался дискуссионным. В настоящее время доминирует мнение, что напряжения I рода – совершенно необходимый фактор образования трещин.

Классификация ХТ по физическим признакам должна быть ориентирована на связь с основными факторами, обуславливающими их образование. Анализ случаев образования ХТ при сварке различных сталей позволил предложить предварительную классификацию видов трещин (табл. 8.4), так как природа ряда видов трещин еще недостаточно изучена. Однако классификация показывает, что понятие "холодные трещины" объединяет все виды трещин, которые образуются при сварке в температурно-временной области преимущественного развития упруго-пластических деформаций (горячие трещины – в области преимущественного развития вязкопластических деформаций).

8.4. Классификация ХТ [17]

Вид трещин, принятые названия	Основные физические процессы или факторы, обуславливающие трещины
Холодные трещины в сварных соединениях перлитных и мартенситных сталей (также откол, подваликовые)	Мартенситное превращение аустенита в околошовной зоне или сварном шве
Отрыв по зоне сплавления легированных сталей при сварке аустенитными электродными материалами	Мартенситное превращение аустенита в зоне перемешивания основного или наплавленного металла
Ламеллярные трещины в ЗТВ перлитно-ферритных сталей (также слоистое растрескивание)	Скопление неметаллических включений в элементах полосчатой микроструктуры стали
Холодные трещины в сварных соединениях легированных бейнитных сталей: а) продольные в однослойных и в области последних слоев многослойных соединений (также отколы);	Превращение аустенита в области нижнего бейнита, насыщение водородом

Окончание табл. 8.4

Вид трещин, принятые названия	Основные физические процессы или факторы, обуславливающие трещины
б) поперечные трещины в многослойных соединениях (также частокол)	Сегрегация примесей на границах аустенитных зерен при последующем нагреве до 300 ... 550 °С в процессе наложения следующих слоев, насыщение водородом
Холодные трещины в сварных соединениях мартенситностареющих сталей: а) однослойных; б) многослойных	Насыщение водородом Сегрегация примесей и фазовые выделения на границах аустенитных зерен при повторном нагреве до 500 ... 700 °С
Холодные трещины в сварных соединениях высокохромистых ферритных сталей	Выделение карбонитридных фаз по границам зерен при охлаждении после сварки
Холодные трещины в сварных соединениях высоколегированных сплавов железа с кобальтом, марганцем и др.	Выделение интерметаллидных фаз; насыщение водородом

К основным способам предотвращения ХТ в сталях при сварке относят [16]:

- выбор рациональной системы легирования свариваемого металла;
- регулирование структуры тепловыми воздействиями;
- выбор состава металла шва;
- выбор исходной структуры стали перед сваркой;
- снижение содержания водорода в металле шва.

Классификация дефектов сварных швов и соединений. В процессе образования сварного соединения в металле шва, ЗТВ и ОМ могут возникать дефекты, приводящие к снижению прочности, эксплуатационной надежности, точности, а также ухудшающие внешний вид изделия. Дефекты оказывают большое влияние на прочность сварных соединений и могут явиться причиной преждевременного разрушения сварных конструкций. Особенно опасны трещиноподобные дефекты (трещины, непровары), резко снижающие

прочность, особенно при циклических перегрузках.

Дефекты сварных соединений по месту их расположения делятся на внутренние и наружные.

К дефектам, связанным с металлургическими и тепловыми явлениями, происходящими в процессе формирования и кристаллизации сварочной ванны и остывания металла, относятся: горячие и холодные трещины в металле шва и околошовной зоне, шлаковые включения.

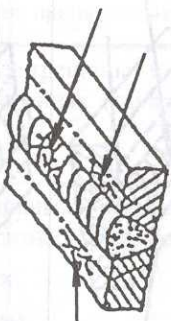
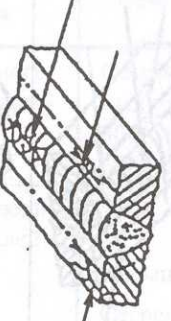


К дефектам, связанным с нарушением режимов сварки, неправильной подготовкой и сборкой элементов конструкции под сварку, неисправностью оборудования, небрежностью и низкой квалификацией сварщика, относят: несоответствие швов расчетным размерам, непровары, подрезы, прожоги, наплывы, несваренные кратеры и др.

В табл. 8.5, в соответствии с ИСО 6520–98, приведена классификация дефектов швов при сварке металлов плавлением.




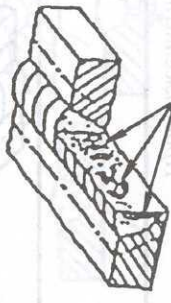
8.5. Классификация дефектов швов при сварке металлов плавлением

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международного института сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>1. <i>Продольные трещины</i> – это трещины, проходящие вдоль сварного шва. Они могут возникать в шве, в ЗС, ЗТВ, ОМ (МИС – Ea)</p>	<p style="text-align: center;"><i>Трещины</i></p> <p>Конфигурация трещин в основном определяется очертаниями линии сплавления ОМ и шва. Они могут возникнуть как из-за наличия высокотемпературной хрупкости сплавов (горячие трещины), так и при замедленном разрушении металла (холодная трещина)</p>	
<p>2. <i>Поперечные трещины</i> – это трещины, проходящие поперек сварного шва. Они могут возникать в шве, в ЗС, ЗТВ, ОМ (МИС – Eb)</p>	<p>Ориентация связана с направлением продольных компонент сварочных напряжений. Причина их возникновения такая же, что и у продольных трещин</p>	
<p>3. <i>Радиальные трещины</i> – это трещины, исходящие из одной точки. Наибольшие трещины этого типа известны как звездчатые трещины. Они могут дообразоваться в шве, ЗС, ЗТВ и ОМ (МИС – E)</p>	<p>Конфигурация трещины определяется макроструктурой зон сварных соединений, а также характером внутренних напряжений. Причина их возникновения такая же, что и у продольных трещин</p>	
<p>4. <i>Кратерные трещины</i> – это трещины в углублении на поверхности шва в месте отрыва дуги. Они могут быть продольными, поперечными и звездчатобразными (МИС – Ec)</p>	<p>Конфигурация трещины определяется микроструктурой зон сварных соединений, а также характером термических, фазовых и механических напряжений</p>	

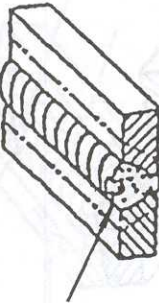

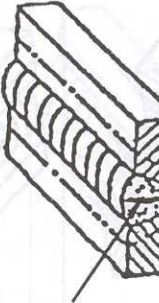
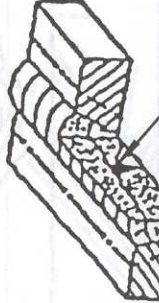
Продолжение табл. 8.5

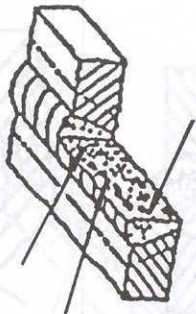
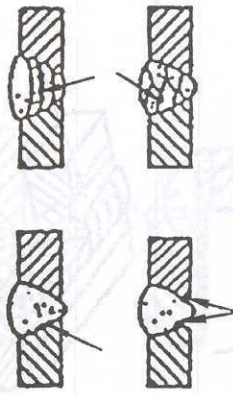
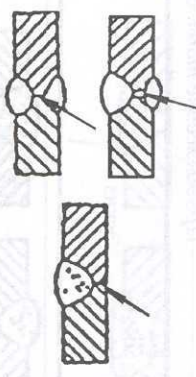
Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международным институтом сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
5. Скопление разведенных трещин – это группа связанных друг с другом трещин. Они могут возникать в шве, ЗТВ, ОМ (МИС – Е)	Конфигурация трещины определяется микроструктурой зон сварных соединений, а также характером термических, фазовых, ликвационных и механических напряжений. Причина их возникновения такая же, что и у продольных трещин	
6. Разветвленные трещины – это группа соединенных трещин, возникающих от образования одной общей трещины. Они могут располагаться в шве, ЗТВ, ОМ (МИС – Е)	Конфигурация трещины определяется микроструктурой зон сварных соединений, а также характером термических, фазовых, ликвационных и механических напряжений. Причина их возникновения такая же, что и у продольных трещин	
<i>Полости (раковины)</i>		
7. Пора – это сферическая полость в металле шва, содержащая задержанный металлом газ (МИС – Аа)	Поры образуются в результате перенасыщения жидкого металла газами, которые не успевают выйти на поверхность во время его быстрой кристаллизации	
8. Равномерно распределенная пористость – это ряд газовых пор, распределенных примерно равномерно в металле шва	Сплошную пористость вызывает большое количество ржавчины и масла на кромках заготовок, а также влажный или крупный флюс	

Продолжение табл. 8.5


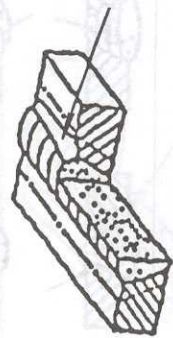

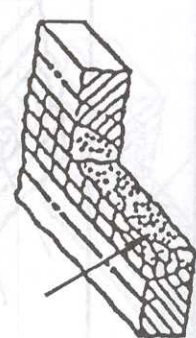
Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международным институтом сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
9. Скопление пор – это группа газовых пор, распределенных локально в металле шва	Вызывается локальным скоплением ржавчины или масла на краях заготовок	
10. Цепочка пор. Цепочку пор составляет ряд газовых пор, расположенных параллельно оси сварного шва	Вызывается, главным образом, подсосом воздуха в зазор между кромками шва	
11. Канальная раковина – это вытянутое в направлении оси шва газовое включение	Обычно возникает в ослабленном стыке зон столбчатых кристаллитов растущих навстречу друг другу от линии сплавления	
12. Канальные поры – это удлиненные поры с различным расположением, отдельные или в скоплениях, например, в виде птичьей лапы (МИС-Ав)	Возникновение этого дефекта, его форма и положение определяются режимом затвердевания шва и характеристиками источников газа	

Продолжение табл. 8.5

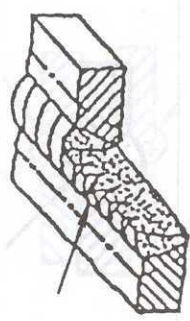



Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международного института сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
13. <i>Поверхностная пора</i> – это небольшая газовая пора, разрывающая поверхность сварного шва	Появление пор связано с рядом металлургических и технологических факторов	
14. <i>Пузырь</i> . Пузырь представляет собой округлую, овальную или продолговатую полость, образовавшуюся в результате выделения газов при кристаллизации сварного соединения	Мелкодисперсные включения на поверхности границ раздела фаз служат центрами зарождения пузырьков газа	
15. <i>Усадочная раковина (междендритная усадка)</i> – это полость, заполненная газом, возникающая в шве при его усадке. Наибольший размер обычно перпендикулярен к поверхности сварного шва (МИС – К)	Усадкой называют самопроизвольное уменьшение объема сварного шва, связанное с его нагревом до жидкого состояния и охлаждением	
16. <i>Свищ</i> – это трубчатая полость в металле шва, вызванная выделением газа (МИС – Аб)	Форма и положение свища определяются режимом затвердевания шва и выделения газа из металла	

<p>Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международный институт сварки (МИС)</p> <p>17. <i>Шлаковое включение</i> – это шлак, попавший в металл сварного шва (МИС-Ва). Металл шва может также иметь флюсовое (МИС-Г), окисное (МИС-И) или металлическое (вольфрамов, медь и др. металлы) включения (МИС-Н). В соответствии с реальными условиями такие включения могут быть одиночными, групповыми или носить строчечный характер</p>	<p>Генетические признаки дефектов</p> <p>Различают эндогенные включения, т.е. такие, которые образуются в результате протекающих в металле процессов, например, химических реакций, и экзогенные включения, образующиеся в результате попадания инородных частиц извне</p>	<p>Эскиз</p> 
<p>18. <i>Несплавление (непровар)</i> – это дефект, заключающийся в местном отсутствии сплавления между металлом шва и ОМ (например, по разделке), или же – между слоями металла шва. Различают непровар по кромке, непровар между валиками по сечению, непровар в корне</p>	<p><i>Несплавления и непровары</i></p> <p>Образование непроваров могут вызвать следующие причины: загрязнение кромок или их неправильная подготовка, (например, уменьшенный угол скоса), низкая сила тока из-за повышенной скорости сварки, смещение внутреннего или наружного швов, блуждание дуги. Непровар между слоями шва получается в результате плохой очистки предыдущих слоев или при нагнетании металла под дугу</p>	
<p>19. <i>Непровар (неполный провар)</i> – это отсутствие сплавления между ОМ одной свариваемой детали и ОМ другой детали вследствие неспособности</p>	<p>Дефект вызван нарушением режимов сварки, небольшого угла разделки кромок, отсутствия зазора, большого притупления и низкой квалификации сварщика</p>	

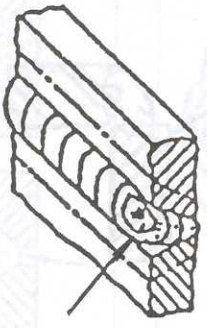
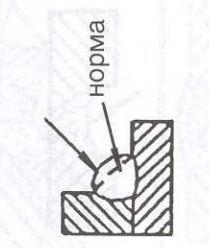
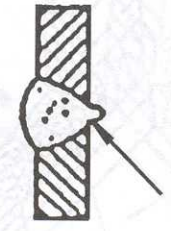
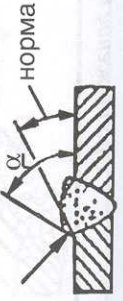
Продолжение табл. 8.5

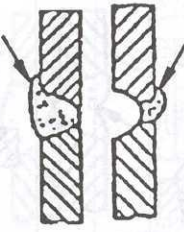


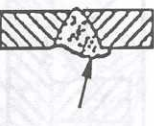

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международного института сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
наплавленного металла проникнуть в корень соединения. Он может присутствовать в корне шва, по его сечению (МИС – D)		
20. <i>Подрез</i> . Подрез представляет собой углубление (канавку) в ОМ, идущее вдоль границы шва. Может иметь большую протяженность или иметь прерывистый характер (МИС – F)	Образование этого дефекта вызывают следующие нарушения технологии: неоправданно большой диаметр электрода, большая скорость сварки, повышенные силы тока и напряжение дуги, слишком длинная дуга, создающая избыточное давление на границе твердый металл–жидкая ванна	
21. <i>Усадочное углубление в корне шва (неглубокий подрез)</i> – это мелкая канавка в корне сварного шва	Вызвано усадкой металла сварного шва с каждой стороны проплава. Усадка возрастает при увеличении угла скоса кромок, т.к. увеличивается объем наплавленного металла	
22. <i>Продольная чешуйчатость, бугристость и наличие седловин на поверхности сварного шва</i>	Дефект вызван повышенным силой тока, слишком высоким или низким напряжением дуги. Дефекты могут возникать вследствие колебания напряжения в сети, проскальзывания проволоки в подающих роликах, неравномерной скорости сварки, неправильного угла наклона электрода	

Продолжение табл. 8.5





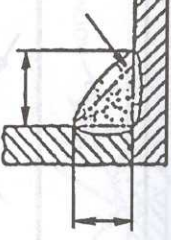
<p>Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международный институт сварки (МИС)</p>	<p>Генетические признаки дефектов</p>	<p>Эскиз</p>
<p>23. Поперечная чешуйчатость, бугристость и наличие седловин на поверхности сварного шва</p>	<p>Неравномерный скос кромок, изменение скорости сварки, низкая квалификация сварщика. Дефекты могут возникать вследствие колебания напряжения в сети, проскальзывания проволоки в подающих роликах, неравномерной скорости сварки, неправильного угла наклона электрода</p>	
<p>24. Неполномерный (просадка шва) стыковой шов</p>	<p>Причиной может быть большой зазор, небрежная работа сварщика. Дефект может образоваться в результате протекания сварочной ванны на обратную сторону шва</p>	
<p>25. Неполномерный (просадка шва) угловой шов</p>	<p>Плохая формовка заготовки, нарушение режима сварки. Дефект может образоваться в результате протекания сварочной ванны на обратную сторону шва</p>	
<p>26. Подрез горизонтального шва – это дефект в виде слишком крутого края шва или углубления по краю шва</p>	<p>Дефект возникает от провисания расплава</p>	

Продолжение табл. 8.5


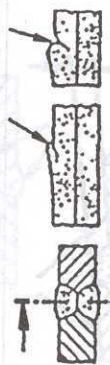
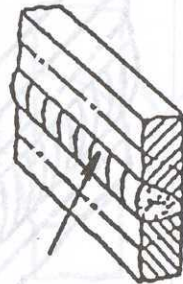
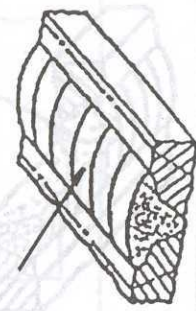

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международный институт сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
27. <i>Кратер</i> – это углубление на поверхности шва в месте обрыва дуги	Дефект возникает вследствие технических неполадок сварочных головок, резкого уменьшения напряжения и силы тока дуги, резкого отрыва дуги	 <p>Эскиз, показывающий поперечное сечение сварного шва с углублением (кратером) на его поверхности.</p>
28. <i>Превышение выпуклости шва</i> – это дефект, связанный с избыточным наплавлением металла на лицевой стороне углового шва	Рабочее сечение углового шва представляет собой прямоугольный треугольник; оно характеризуется двумя размерами – катетом (K) и его высотой h . При $h = K$ – шов выпуклый. Дефект возникает из-за недостаточной силы тока и малой скорости сварки	 <p>Эскиз, показывающий поперечное сечение углового шва с выпуклостью на лицевой стороне. Катет обозначен как K, а высота – как h. Надпись «норма» указывает на стандартное соотношение.</p>
29. <i>Превышение проплава корня шва</i> (<i>превышение проплава</i>) – это дефект, связанный с избытком наплавленного металла, проникающего в корень шва	Плохая формовка заготовки, небрежная работа сварщика. Дефект может иметь локальный характер или возникать на всем протяжении корня шва	 <p>Эскиз, показывающий поперечное сечение шва с избыточным наплавлением металла в корневой зоне.</p>
30. <i>Резкий переход от шва к ОМ</i> . Неправильный профиль сварного шва в виде резкого перехода от шва к ОМ	Нарушение режима сварки, небрежная работа сварщика	 <p>Эскиз, показывающий поперечное сечение шва с резким переходом от шва к основному металлу (ОМ). Угол α обозначает угол наклона поверхности шва. Надпись «норма» указывает на стандартный вид.</p>

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международный институт сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>31. <i>Напльвы на поверхности и у корня шва.</i> Между напльвом и поверхностью сварного соединения нет монолитности. Они могут быть местными в виде отдельных застывших капель или иметь значительную протяженность вдоль шва</p>	<p>Причиной могут быть чрезмерные силы тока и напряжения при длинной дуге и большая скорость сварки, неправильного положения электрода, большой угол наклона изделия при сварке на подъем и спуск. В кольцевых швах напльвы образуются при недостаточном или излишнем смещении электрода с зенита</p>	
<p>32. <i>Линейное смещение кромок шва,</i> при котором поверхности двух свариваемых частей параллельны, но размещены не на требуемом уровне</p>	<p>Плохая формовка заготовок</p>	
<p>33. <i>Угловое смещение кромок,</i> при котором плоские поверхности двух свариваемых частей непараллельны (или не направлены под требуемым углом)</p>	<p>Нарушение технологического процесса сборки заготовок</p>	
<p>34. <i>Провисший шов</i> — это протек при горизонтальном положении сварки</p>	<p>Металл сварного шва оседает вследствие действия силы тяжести</p>	
<p>35. <i>Запавший шов</i> — это протек в нижнем или потолочном положении сварки</p>	<p>Металл сварного шва оседает вследствие действия силы тяжести, например, из-за чрезмерной силы тока и напряжения при длинной дуге</p>	

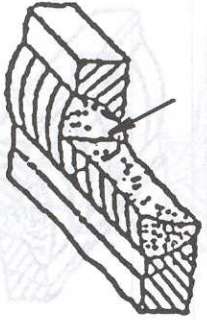
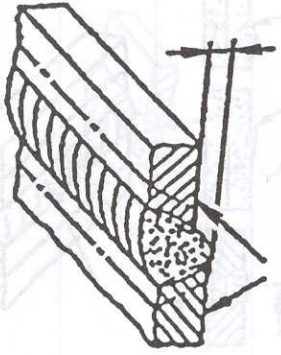
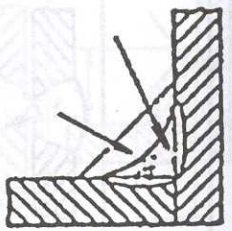
Продолжение табл. 8.5

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международного института сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
36. <i>Плоский угловой шов</i> – это протек в угловом сварном шве с формированием недопустимо малого значения катета углового шва	Оседание металла, например, из-за большой скорости сварки	
37. <i>Протек (сильное расплавление) кромок</i> – это протек с большим отклонением размера катета углового шва от номинального значения	Дефект может возникать из-за смещения электрода в сторону вертикальной стенки, что вызывает значительный разогрев, плавление и отекание ее металла на горизонтальную полку	
38. <i>Прожог</i> – это сквозное проплавление дугой свариваемых кромок с выходом жидкого металла сварочной ванны на другую сторону шва	Причиной может быть – недостаточное притупление кромок, чрезмерный зазор между ними, повышенные режимы сварки	
39. <i>Утяжина на поверхности сварного шва</i> – это канавка в шве, образовавшаяся вследствие усадки металла шва	Образуется при отклонении параметров сварочного процесса от номинальных значений	
40. <i>Асимметрия углового шва</i> , связанная с тем, что размер одного из катетов углового шва очень большой	Низкая квалификация сварщика	


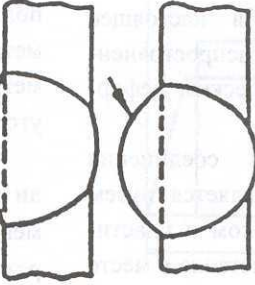
Продолжение табл. 8.5

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международного института сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
41. <i>Вогнутость корня сварного шва</i> в виде усадочного продольного углубления	Образуется при отклонении параметров сварочного процесса от номинальных значений	
42. <i>Дефекты поверхности в начале шва</i>	Отклонение параметров начала сварка от номинальных значений	
43. <i>Недостаточная ширина сварного шва</i>	Дефекты могут возникнуть вследствие колебания напряжения в сети, проскальзывания проволоки в подающих роликах, неравномерной скорости сварки, неправильного угла наклона электрода	
44. <i>Чрезмерная ширина сварного шва</i>	Дефекты могут возникнуть вследствие колебания напряжения в сети, проскальзывания проволоки в подающих роликах, неравномерной скорости сварки, неправильного угла наклона электрода	
45. <i>Асимметричный шов</i> с асимметрией формы шва или его размещения относительно намеченной линии	Отступление в технологии при автоматической сварке в низкой квалификации или культуры сварщика при ручной сварке	

Продолжение табл. 8.5

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международный институт сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
46. <i>Чрезмерный зазор</i> . Дефект в виде недопустимо большого расстояния между свариваемыми элементами	Отклонение величины зазора от нормальной происходит вследствие неточной сборки, смещения и коробления деталей под действием термических и усадочных напряжений наплавленного металла и неточной разделки кромок	
47. <i>Смещение по шву</i> . Дефект в виде неправильного положения свариваемых элементов относительно шва	Отклонение сборки деталей под сварку от оптимального технологического процесса: (порядок сборки, способ крепления деталей, методы контроля сборки и т.п.)	
48. <i>Грубая поверхность</i> . Дефект в виде наплывов, чешуйчатости и бугристости на поверхности углового шва	Дефекты возникают вследствие колебания напряжения в сети, проскальзывания проволоки в подающих роликах, неравномерной скорости сварки, неправильного угла наклона электрода	

Окончание табл. 8.5

Термины, определения, их морфологические признаки и обозначения международного института сварки (МИС)	Генетические признаки дефектов	Эскиз
49. <i>Несимметричное расположение наружного и внутреннего слоев сварного шва</i> . Дефект, при котором значительно смещены оси наружного или внутреннего швов от условной оси стыка	Возникает вследствие увода наружного или внутреннего шва от условной оси стыка	
50. <i>Правышение усиления сварного шва</i> – избыток наплавленного металла на лицевой стороне (ах) стыкового шва	Дефект возникает из-за нарушения режимов сварки (малый ток и т.п.)	

8.2. ДЕФЕКТЫ СВАРКИ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

Контактная сварка в настоящее время является наиболее распространенным видом сварки пластическим деформированием (давлением).

Процесс образования соединения элементов детали осуществляется путем нагрева их проходящим током и пластическим деформированием металла в месте контакта.

Стыковая сварка — это разновидность контактной сварки, при которой соединение осуществляется по всей поверхности соприкосновения свариваемых элементов изделия.

Стыковую сварку с разогревом кромок деталей до пластического состояния называют сваркой сопротивлением, а при разогреве кромок деталей до оплавления — сваркой оплавлением.

При сварке сопротивлением детали, зажатые в электродах стыковой машины, сжимаются небольшим усилием, обеспечивающим образование физического контакта свариваемых поверхностей. Затем через контакт пропускают ток, металл разогревается до пластического состояния и производится осадка, сопровождающаяся пластическими деформациями и образованием активных центров взаимодействия. В результате образуется соединение, характерное для процессов сварки в твердой фазе.

Взаимосвязь между током I (нагрев и повышение пластичности) и давлением P (фактор, обуславливающий пластические деформации) во времени t (цикл сварки сопротивлением) показана на рис. 8.8. Локально деталь после сварки имеет заметное утолщение. Оно получается в ре-

зультате пластического деформирования (высадки) металла в месте стыка.

Сварку оплавлением успешно используют для элементов с малым периметром (круг, квадрат) и большим периметром (тонкостенные трубы, листы, угольники и т.д.).

В процессе выполнения сварки детали сближаются с постоянной или переменной скоростью при прохождении через контакт сварочного тока. В начальной стадии оплавления вступают в контакт микро- и макровыступы поверхностей торцов твердого металла. В дальнейшем возможны контакты между пленками жидкого металла и его оксидами.

Цикл сварки непрерывным оплавлением показан на рис. 8.9. По времени он состоит из фазы оплавления t_0 и фазы сопротивления t_c . Этот процесс осуществляется преимущественно на машинах с механизированным электрическим приводом осадки. Способ непрерывного оплавления удобен главным образом для массового производства однотиповых деталей.

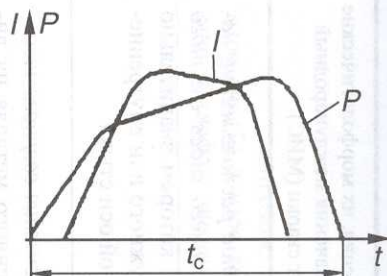


Рис. 8.8. Цикл стыковой сварки сопротивлением с приложенным усилием сжатия электродов и измеряющегося во времени действия сварочного тока

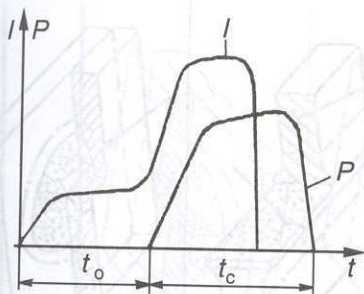


Рис. 8.9. Цикл стыковой сварки оплавлением

Точечная сварка. При точечной сварке детали сварных соединений устанавливают внахлестку и сжимают с некоторым усилием между двумя медными электродами.

При протекании тока через медные электроды и свариваемые детали происходит очень быстрый нагрев металла деталей, заключенного между электродами. При этом внутренние слои металла нагреваются быстрее наружных. Это объясняется тем, что контактное сопротивление между электродом и деталью меньше контактного сопротивления между деталями. Кроме того, охлаждаемые водой медные электроды интенсивно отводят теплоту от места их контакта с деталью.

Для получения соединения высокого качества необходимо, чтобы перед сваркой контактные поверхности деталей были хорошо очищены и строго соблюдались параметры технологического режима (давление, ток и время протекания тока). Сварку осуществляют по циклу сопротивления, графическое изображение которого представлено на рис. 8.10.

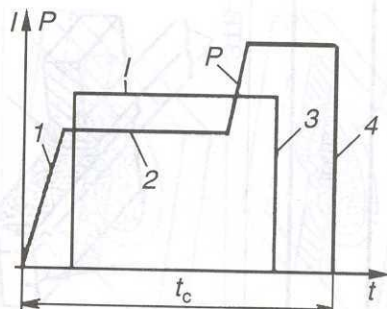


Рис. 8.10. Цикл точечной сварки:

1 — сжатие детали электродами; 2 — включение тока и разогрев металла в контакте между свариваемыми деталями до жидкопластического состояния; 3 — выключение тока; 4 — снятие усилия с электродов

Шовная сварка. При шовной сварке так же, как и при точечной сварке, детали сварного соединения собирают внахлестку и зажимают между медными роликами (электродами). Если роликам сообщить вращательное движение с одновременным пропусканием тока по сварочной цепи, то точка будет превращаться в сплошной герметичный шов.

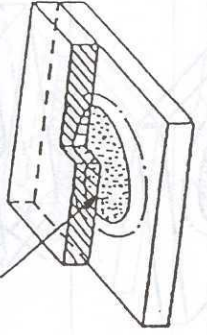
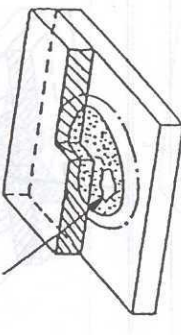
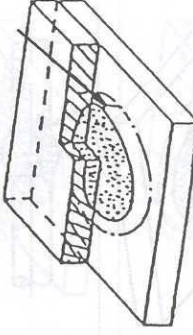
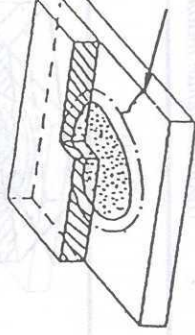
В сварочной практике находят применение два цикла шовной сварки: с непрерывным и с прерывистым протеканием тока.

Основные группы дефектов сварных соединений из металлических материалов, выполненных с использованием пластического деформирования, приведены в табл. 8.6.

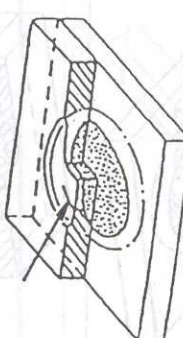

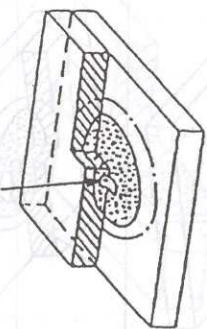
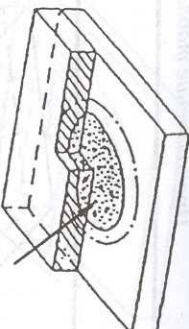
8.6. Дефекты сварных соединений из металлических материалов, выполненных с использованием пластического деформирования

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>1. <i>Продольные трещины.</i> Трещины, проходящие вдоль сварного шва. Они могут возникнуть в шве, в ЗТВ и в основном металле (ОМ)</p>	<p><i>Трещины</i></p> <p>После затвердевания, охлаждения и усадка металла литой зоны продолжатся и сопровождаются возникновением внутренних растягивающих напряжений. В тех местах, где эти напряжения превысили вязкопластическую деформацию, возникают горячие трещины, а в местах, где превысили упругопластическую деформацию – холодные трещины. Трещины могут быть ориентированы приблизительно параллельно оси шва</p>	
<p>2. <i>Поперечные трещины.</i> Трещины, проходящие поперек сварного шва. Они могут возникать в ОМ и ЗТВ</p>	<p>Трещины также могут быть ориентированы перпендикулярно оси шва. Это связано с направлением главных компонент сварочных напряжений</p>	
<p>3. <i>Трещины в центре ядра сварной точки.</i> Чаще бывают в форме звезды</p>	<p>При сварке высокопрочных алюминиевых сплавов в центре литой зоны наблюдается тонкая равноосная структура с микрористостью и внутренними напряжениями, что и приводит к возникновению внутренних трещин</p>	

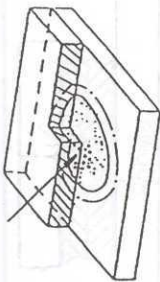

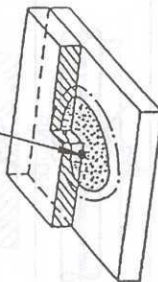
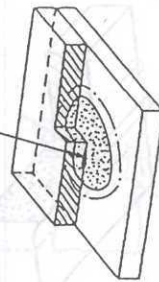
Продолжение табл. 8.6

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>4. Трещины на краю ядра сварной точки. Чаше бывают в форме запытой.</p>	<p>Трещины на краю литой зоны более опасны, чем в ее центре. Причиной дефекта может быть то, что загрязнения и окислы менее электропроводны, чем основной металл и электродинамическими силами при сварке смещаются на периферию литой зоны</p>	
<p>5. Трещины в ядре сварной точки, параллельные контакту. Обычно ближе к краю ядра сварной точки</p>	<p>Конфигурация трещин в основном определяется очертанием линии сплавления</p>	
<p>6. Трещины в ЗТВ</p>	<p>В этой зоне в основном возникают холодные трещины, а их конфигурация определяется макроструктурой ЗТВ</p>	
<p>7. Трещины в ОМ</p>	<p>Холодные трещины в соединениях легированных сталей могут образовываться в основном металле в результате сварочных растягивающих напряжений</p>	

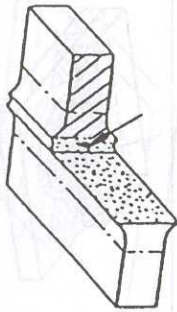

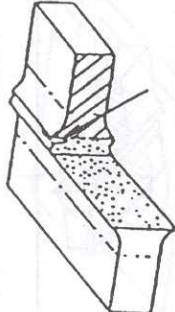
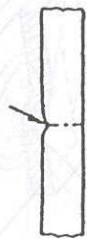

Продолжение табл. 8.6

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
8. <i>Поверхностные трещины.</i> В зоне расположения электродов	Такие дефекты возникают при затвердевании металла литой зоны при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов. Для устранения наружных трещин необходимо повысить сварочное усилие и "смягчить" режим сварки	
9. <i>Трещины в грате</i>	Дефекты могут возникнуть в результате сегрегации примесей и фазовых выделений на границе зерен и высоких сварочных напряжений	
<i>Раковины</i>		
10. <i>Газовые раковины и поры.</i> Заполненные газом пространства в ядре сварной точки	Кристаллизация расплавленного металла ядра происходит в закрытой форме. Если деформация стенок этой формы под действием усилий сжатия электродов недостаточна для компенсации объемных изменений, возникающих при затвердевании, то после кристаллизации металла ядра образуются усадочные пустоты в виде пор и раковин	
11. <i>Пористость.</i> Многочисленные рассеянные поры	Склонность к образованию пор и раковин увеличивается с возрастанием толщины свариваемых деталей	

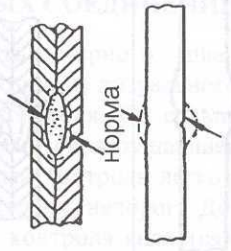
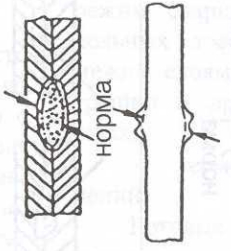
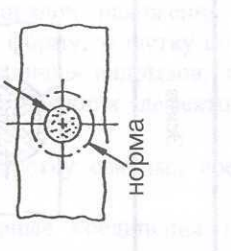
Продолжение табл. 8.6

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
12. Скопление пор. Локальное скопление пор	В литой зоне большинства высокопрочных сталей и жаропрочных сплавов даже при использовании мягких режимов сварки трудно избежать локальных скоплений мелких пор	
13. Канальные поры. Удлиненные поры с различным расположением, отдельные или в скоплении	Загрязнение по контакту может быть одной из причин возникновения таких дефектов	
<i>Твердые включения</i>		
14. Твердые включения. Включение в ядре сварной точки или в сварном шве	Дефект может возникнуть на поверхности детали механическим путем, и не выведен из литой зоны при термодинамическом цикле сварки	
15. Окисные пленки. Тонкий окисный слой в ядре сварной точки или в сварном шве	Окисные пленки, образовавшиеся в процессе прокатки или термической обработки металла до сварки, могут присутствовать даже в центральной части литой зоны. Если с момента пассивации стальных деталей до сварки проходит значительный срок, то образовавшаяся пленка остается частично нерасплавленной на границе литой зоны. В литой зоне также может находиться нерасплавленный плакирующий слой	

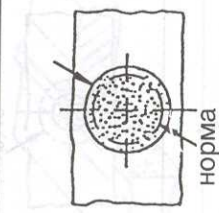
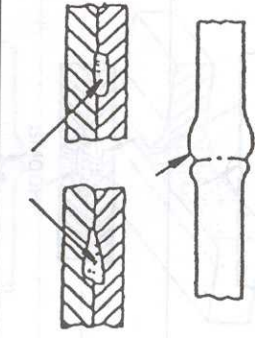
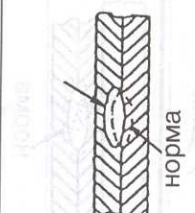
Продолжение табл. 8.6

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
16. <i>Шлаковые включения</i> . Неметаллические включения в ядре сварной точки или в сварном шве; отдельные или в скоплениях	В заготовках, поступающих на сварку, особенно в литых, имеются дефекты типа шлаковых включений. В таких случаях металл литой зоны может иметь дефекты, присущие этой технологической операции	
17. <i>Остатки расплава с примесями</i> . Затвердевшие в сварном шве остатки расплава с примесями	В этих местах наблюдаются углубления и изменения микроструктуры основного металла	
<i>Непровары</i>		
18. <i>Непровар</i> . Отсутствие соединения или недостаточное соединение состыкованных поверхностей	Уменьшение выделения тепла в сварочном контакте, отклонение от оптимального закона ввода тепла в зону сварки за время протекания сварочного тока	
<i>Дефекты формы</i>		
19. <i>Подрезы</i> . Углубления в сварном шве	Нарушение геометрических размеров и форм сварных элементов и узлов	
20. <i>Смещение кромок</i> . Параллельное смещение деталей	Нарушение геометрических размеров и форм сварных элементов и узлов	

Продолжение табл. 8.6

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>21. Недостаточная толщина ядра. Ядро сварной точки очень плоское или недостаточная толщина сварного шва</p>	<p>Уменьшение выделения тепла в сварочном контакте может происходить из-за отклонения параметров режима сварки от заданных значений: уменьшение сварочного тока, увеличение сварочного усилия и т.п.</p>	
<p>22. Слишком большая толщина ядра сварной точки или слишком большая толщина сварного шва. Ядро сварной точки слишком толстое или слишком широкий сварной шов</p>	<p>Одной из причин дефекта может быть интенсивное тепловыделение в контакте, возникающее при плохой подготовке поверхности (высокое сопротивление контакта)</p>	
<p>23. Слишком маленький диаметр ядра сварной точки. Отклонение от заданного диаметра ядра сварной точки</p>	<p>Причиной дефекта может быть нарушение соотношения между вводимым в зону сварки количеством тепла, необходимого для формирования сварного соединения нормальных размеров, а также из-за малого шага сварных точек, вследствие шунтирования тока в соседние точки</p>	

Окончание табл. 8.6

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>24. Слишком большой диаметр ядра сварной точки. Отклонение от заданного диаметра ядра сварной точки</p>	<p>Дефект может возникнуть в результате использования чрезмерно форсированных режимов сварки, а также уменьшение сварочного усилия $F_{св}$ и загрязненная поверхность деталей и электродов, так как при этом в контактах повышается сопротивление и, как следствие, тепловыделение</p>	
<p>25. Асимметричное ядро сварной точки (сварного шва). Асимметрия формы и/или положения ядра сварной точки или сварного шва</p>	<p>Причиной такого дефекта может быть неправильная установка электродов (перекос осей) или при сварке металлов с резко различными теплофизическими свойствами</p>	
<p>26. Недостаточная глубина внедрения ядра сварной точки. Точка сварки с односторонним проплавом</p>	<p>Такое формирование литой зоны возможно при сварке металлов с резко различными теплофизическими свойствами, деталей разной толщины. Причиной могут быть неправильно выбранные размеры рабочей поверхности электродов, режим сварки и износ электродов</p>	

8.3. ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Целостность сварного шва часто проверяется методами визуального и измерительного контроля. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля визуальный контроль легко применим и относительно недорог. Доказано, что этот метод контроля является надежным источником точной информации о соответствии сварных изделий техническим условиям.

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.

В процессе изготовления и монтажа сварных конструкций осуществляют систематический контроль качества производства сварочных работ – предварительный контроль, пооперационный контроль и контроль готовых сварных соединений.

При предварительном контроле подлежат проверке квалификация сварщика, термиста и дефектоскописта; качество сварочных материалов, состояние сварочного оборудования, сборочно-сварочных приспособлений, термического оборудования, аппаратуры и приборов для дефектоскопии.

При операционном контроле проверяют:

- соответствие марки материала свариваемых элементов (деталей) запроектированной марке стали стилоскопированием;
- качество и геометрию размеров полуфабрикатов;
- качество подготовки заготовок под сварку;
- качество сборки перед сваркой;

– режимы предварительного подогрева;

– 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;

– термообработку сварных соединений.

Готовые сварные соединения подвергают:

- внешнему осмотру и измерению;
- испытанию на твердость шва;
- ультразвуковой или радиографической дефектоскопии, или другим методам неразрушающего контроля;
- механическим испытаниям;
- металлографическим испытаниям;
- гидравлическому испытанию в керосиновой пробе.

Контроль качества и геометрических размеров полуфабрикатов. Задачей визуального контроля основного материала, полуфабрикатов (труб, листов, поковок) 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 правильности маркировки.

Задачей измерительного контроля полуфабрикатов является подтверждение их геометрических размеров и определение размеров поверхностных дефектов.

При входном визуальном контроле сварных труб с прямолинейным или спиральным швом обычно подлежит контролю не менее 10 % длины каждого шва на участках, равномерно расположенных по длине шва трубы.

Контроль подготовки изделий под сварку и сборки деталей под сварку. Подготовка изделий под сварку оказывает

определенное влияние на качество сварного соединения. Основными этапами проверки являются: контроль чистоты поверхности, геометрических размеров разделки шва, форма обработки внутренних поверхностей кольцевых деталей, материал и форма подкладных колец и расплавляемых вставок, качество прихваток.

Недопустимо в разделке шва и на прилегающей к ней поверхности наличие влаги, ржавчины, окалины, масел, краски и других загрязнений. Поверхности кромок не должны иметь надрывов, трещин, значительных шероховатостей и неровностей.

Узлы и детали конструкций собирают под сварку в сборочных приспособлениях (стяжных планках, скобах, центраторах и т.п.) или на выверенных стеллажах.

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 5264-80 (в ред. 1989 г.), ГОСТ 11533-75 (в ред. 1992 г.), ГОСТ 11534-75 (в ред. 1992 г.), ГОСТ 14771-76 (в ред. 1989 г.), ГОСТ 14776-79, ГОСТ 15164-78 (в ред. 1990 г.), ГОСТ 23518-79. Отклонения прямоугольности кромок от проектного очертания определяются допусками на зазоры, устанавливаемыми ГОСТ 5264-80 (в ред. 1989 г.), ГОСТ 8713-79 (в ред. 1991 г.) и ГОСТ 14771-76 (в ред. 1989 г.).

Основными контролируруемыми размерами при сборке являются:

- для стыковых швов – зазор между кромками (рис. 8.11), притупление (рис. 8.12), угол скоса кромок (рис. 8.13), смещение кромок с внутренней (наружной) стороны соединения (рис. 8.14);

- для нахлесточных соединений – ширина нахлестки и зазор между металлами;

- для тавровых соединений – угол и зазор между свариваемыми деталями, притупление и угол скоса кромок;



Рис. 8.11. Схема измерения зазора

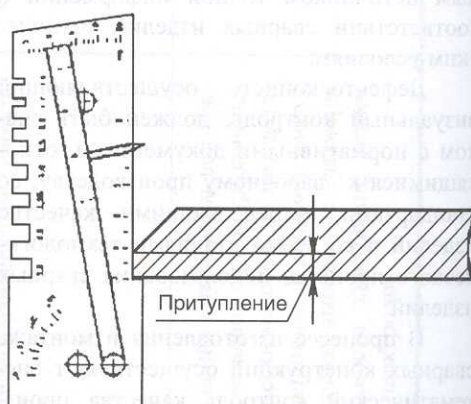


Рис. 8.12. Схема измерения притупления кромок

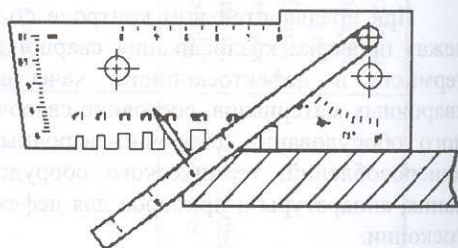


Рис. 8.13. Схема измерения угла скоса кромок

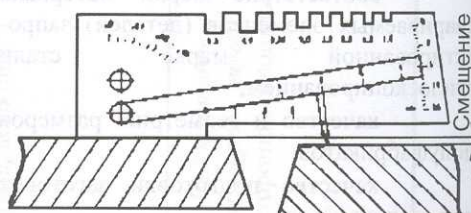


Рис. 8.14. Схема измерения смещения наружных кромок деталей

— для угловых соединений — зазор между свариваемыми деталями и угол между ними.

От качества подготовки и геометрических размеров разделки шва в значительной степени зависит качество сварного соединения и производительность сборочных работ.

В результате завышения угла скоса кромок происходит перерасход электродного 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.

Геометрические размеры разделки шва проверяют с помощью специальных инструментов — шаблонов.

Сборочные прихватки выполняются сварщиками высокой квалификации и теми же сварочными материалами и того же качества, что и основные швы сварных соединений.

При проверке качества прихваток следует обращать внимание на их чистоту и высоту. Загрязненные, с удаленным шлаком, прихватки могут привести к шлаковым включениям в металле шва, а прихватки большой высоты — к непровару.

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.

Контроль качества сварочных материалов и выполнения сварочных швов. В процессе производства визуальный контроль может быть использован для контроля электродов, флюса, защитных газов, сварочной и наплавочной проволоки, сварочного оборудования и приборов, процесса сварки и условий сварки.

Сварочные материалы должны иметь сертификаты, в которых полностью приведены данные в соответствии с требованиями ГОСТов, технических условий и паспортов.

На упаковочных коробках, ящиках, баллонах, пачках должны быть бирки или этикетки с указанием основных паспортных данных.

Основное условие при выборе и назначении режимов сварки — обеспечение требуемых размеров, формы шва и провара заданной величины.

Сводные данные о влиянии параметров режима сварки на размеры и форму шва приведены в табл. 8.7. 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 оси стыка, а последующие поочередно смещаются на свариваемые кромок во избежание непроваров кромок.

Контроль наложения первого и очередных слоев сварного шва иногда выполняется с помощью эталона или только осмотром. Типичный эталон — это отрезок сварного шва, подобного изготавливаемому, демонстрирующий ряд последовательно навариваемых слоев. Каждый слой производимого сварного шва 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;

8.7. Влияние параметров режимов сварки на форму, размеры и состав шва

Увеличение параметров	Глубина провара	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	-	+	-	+	-

Примечание. "+" – увеличивается; "-" – уменьшается

большого объема основного металла по сравнению с объемом металла первого слоя стыка;

свариваемый стык может быть достаточно холодным, а дуга – не достигать корня шва первого слоя. Эти трещины могут не только сохраняться, но и распространяться на следующие слои.

Визуальный контроль первого слоя шва должен быть полным и производиться тщательным сравнением с эталоном многопрокатного шва или внимательным осмотром. Внимательный контроль первого слоя многопроходного шва помогает распознавать расхождение свариваемых деталей, которое увеличивается под влиянием тепла, выделяемого при сварке. В процессе наложения первого слоя шва

должен контролироваться зазор между свариваемыми кромками.

Особое внимание следует уделять качеству прихваточных швов, зажимов и растяжек, предназначенных для сохранения необходимых расстояний между свариваемыми кромками.

Важность этого утверждения не ограничивается только соединениями встык, но и распространяется на другие виды соединений.

Внешний осмотр и обмеры сварных швов и соединений. Внешний осмотр и обмеры сварных швов и соединений являются первыми контрольными операциями по приемке готового узла или изделия. Им подвергаются все сварные швы

независимо от того, как они будут испытаны в дальнейшем.

Визуальный и измерительный контроль полезен для проверки наиболее важных характеристик законченного изделия, включая:

1) соответствие размеров законченного сварного соединения нормативно-технической документации;

2) определение законченности шва и соответствие сварного шва требуемому расположению, размерам и контуру;

3) приемлемость общего вида шва (включая шероховатость поверхности, наличие складок и сварных брызг);

4) наличие зачистки металла в местах приварки временных технологических креплений, гребенок индуктора и поверхности сварного соединения под последующий неразрушающий контроль;

5) отсутствие (наличие) поверхностных трещин всех видов и направлений, отсутствие (наличие) на поверхности сварных соединений дефектов (пор, включений, отслоений, прожогов, свищей, наплавов, усадочных раковин, подрезов, непроваров, западаний между валиками, грубой чешуйчатости, прожогов металла, а также мест касания сварочной дугой поверхности основного металла;

6) контроль размеров поверхностных дефектов;

7) наличие маркировки (клеймения) шва и правильности ее выполнения.

Соответствие размеров законченного сварного соединения определяется, как правило, обычными методами измерения.

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 независимо от их количества. С этой целью можно использовать ряд измерительных приборов; одни – для определения отклонений формы, другие – для определения отклонений положения.

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 измеряют их ширину и выпуклость (рис. 8.15, *а*, *в*), вогнутость шва (рис. 8.15, *б*), глубину подреза (рис. 8.15, *г*), чешуйчатость и глубину западания между валиками (рис. 8.15, *д*); в угловых швах, соединениях внахлестку и в тавр – катет шва (рис. 8.15, *ж*). На рис. 8.16 даны графические изображения выпуклости (вогнутости) и толщины углового шва.

Значения указанных выше величин, а также допускаемые отклонения устанавливаются Правилами устройства и безопасной эксплуатации, стандартах (например, ГОСТ 5264–80 (в ред. 1989 г.), ГОСТ 14771–76 (в ред. 1989 г.), ТУ, СНИП, НТД, ПТД и рабочими чертежами изделий.

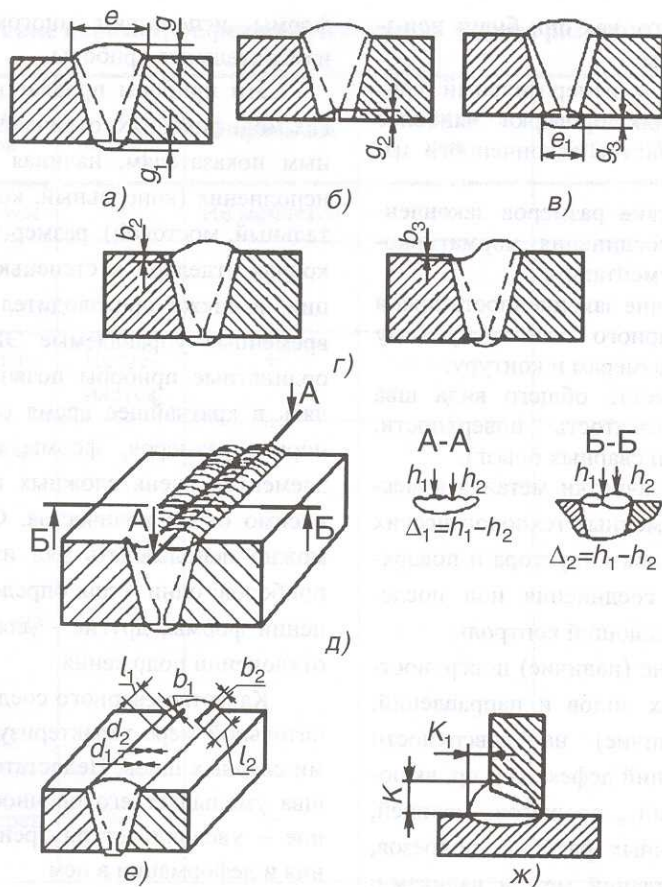


Рис. 8.15. Размеры сварного шва и его дефектов, подлежащие измерительному контролю: a – ширина (e), выпуклость (g, g_1); b – вогнутость корня сварного шва (g_2); $в$ – ширина лицевой стороны двухстороннего сварного шва (e_1), выпуклость (g_3); $г$ – подрез зоны сплавления (b_2) и неполное заполнение разделки кромок (b_3); $д$ – чешуйчатость (Δ_1) и западание между валиками шва (Δ_2); $е$ – размеры поверхностных дефектов; $ж$ – катет шва (K, K_1)

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 (см. рис. 5.4). 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 (см. рис. 5.7 и 8.12). Требования к общему виду (профилю) сварного шва неоднозначны и должны быть определены в НТД.

Эталоны для визуального контроля или образцы сварки, согласованные с органами надзора или потребителем, можно использовать как руководство по оценке качества внешнего вида сварного шва.

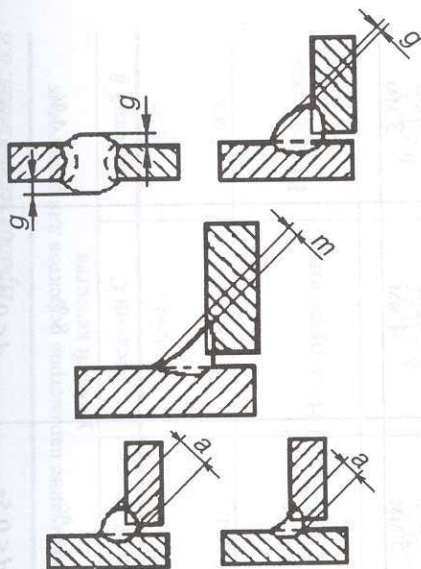


Рис. 8.16. Графическое изображение выпуклости (g), вогнутости (m) и толщины (a) углового шва

Иногда требуется гладкий шов, строго равномерный по размеру, т.к. шов образует часть наружной поверхности изделия.

По внешнему виду шва можно установить причину появления тех или иных дефектов. Так, при малом токе шов получается слишком высоким, с закругленными краями и неглубоким проваром; повышенный 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.




Нормы на допустимые дефекты в сварных металлических конструкциях. В настоящее время существует множество стандартов на допустимые дефекты в тех или иных конструкциях. Данные этих стандартов наглядно демонстрируют, что нормы на одни и те же дефекты значи-

тельно отличаются в зависимости от класса конструкции. С другой стороны, анализ этих норм показывает, что различные нормативы, казалось бы, предназначенные для конструкций, эксплуатирующихся в аналогичных условиях, не согласуются по классам качества сварных швов даже для наиболее легко выявляемых дефектов, например типа пор и шлаковых включений.

Одной из причин такого положения является то, что при выработке норм приходится принимать компромиссные решения между различными противоречивыми требованиями, исходящими из положений механики разрушения и разрешающей способности существующих методов и средств неразрушающего контроля, поскольку нельзя не считаться с практикой, даже если в ней встречаются субъективные положения. Однако предельно ясно, что различные нормы – это обобщающие плоды терпеливой, добросовестной и совместной работы специалистов различного профиля.

Ниже (табл. 8.8), в качестве примера норм 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/ТК44 "Сварка и относящиеся к ней процессы", Подкомитетом ПК10 "Унификация требований к сварным соединениям металлов", и предназначен для использования в качестве справочного материала при проведении работ, требующих стандартизации. Три уровня качества, обозначенные как D – низкий, C – средний и B – высокий, определяемые этим стандартом, предназначены только для выработки

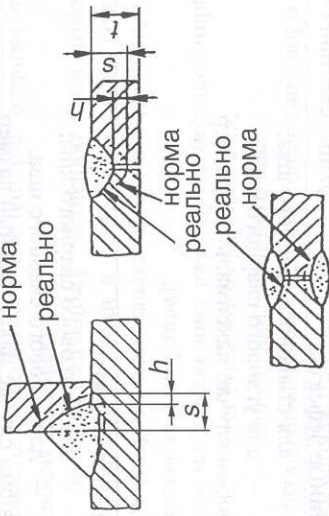
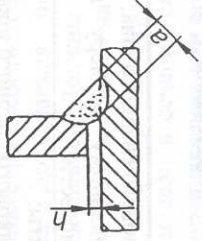
8.8. Оценка уровня качества сварных швов согласно ИСО 5817-92

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
1. Трещины	Все типы трещин за исключением микротрещин ($h \times l < 1$ мм) и кратерных трещин	Не допускаются		
2. Кратерные трещины		Допускаются		
3. Пористость и газовые поры	<p>Должны выполняться следующие ограничения и условия на дефекты:</p> <p>а) по максимальному значению относительной суммарной площади в сечении сварного соединения (ширина проплавления или его глубина, умноженная на длину шва);</p> <p>б) по максимальному размеру наибольшей поры:</p> <ul style="list-style-type: none"> — для стыкового сварного шва; — для углового сварного шва; <p>в) по максимальному размеру одиночной поры</p>	<p>4 %</p> <p>$d \leq 0,5s$ 0,5a 5 мм</p>	<p>2 %</p> <p>$d \leq 0,5s$ 0,4a 4 мм</p>	<p>1 %</p> <p>$d \leq 0,3s$ 0,3a 3 мм</p>
4. 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. Допускаемая пористая область должна быть локальной. Должны выполняться следующие ограничения и условия на дефекты: <p>а) по максимальному значению относительной суммарной площади в сечении сварного соединения (ширина проплавления или его глубина, умноженная на длину шва);</p> <p>б) по максимальному размеру наибольшей поры;</p>	<p>16 %</p> <p>$d \leq 0,5s$</p> 	<p>8 %</p> <p>$d \leq 0,4s$</p> 	<p>4 %</p> <p>$d \leq 0,3s$</p> 

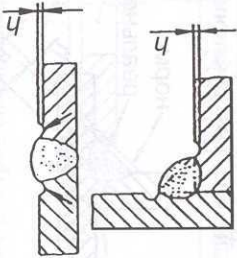
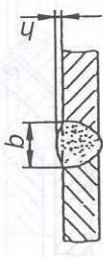
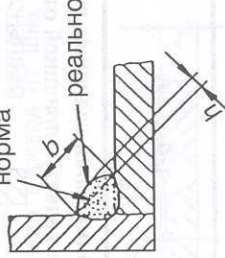
Продолжение табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
5. Удлиненные полости, газовые раковины	в) для углового сварного шва; по максимальному размеру локализованной групповой пористости	0,5a	0,4a	0,3a
		4 мм	3 мм	2 мм
5. Удлиненные полости, газовые раковины	Длинные дефекты: — для стыкового сварного шва; — для углового сварного шва. В любом случае максимальный размер	$h \leq 0,5s$ 0,5a 2 мм	Не допускаются	Не допускаются
		$h \leq 0,5s$ 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
6. Твердые включения	Длинные дефекты: — для стыкового сварного шва; — для углового сварного шва. В любом случае максимальный размер	$h \leq 0,5s$ 2 мм	Не допускаются	Не допускаются
		$h \leq 0,5s$ 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
7. Медные включения		Не допускаются		

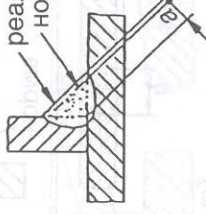
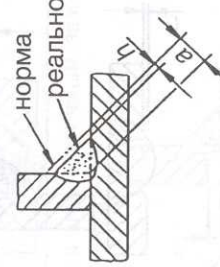
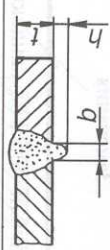
Продолжение табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
8. Несплавления		Допускаются прерывистые и без нарушения поверхности		
9. Отсутствие проплавления (неполное проплавление)		Не допускаются		
		Длинные дефекты не допускаются		
10. Неправильная сборка заготовок под сварку		Не допускаются		
		Короткие дефекты	$h \leq 0,1s$ максимально 1,5 мм	
		$h \leq 0,2s$ максимально 2 мм	$h \leq 0,5 \text{ мм} + 0,2a$ максимально 3 мм	$h \leq 0,5 \text{ мм} + 0,1a$ максимально 2 мм
	Чрезмерный или недостаточный зазор между соединяемыми деталями	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,3a$ максимально 4 мм		
	Зазоры, превышающие установленные размеры, в некоторых случаях могут быть компенсированы соответствующим увеличением размера шва			

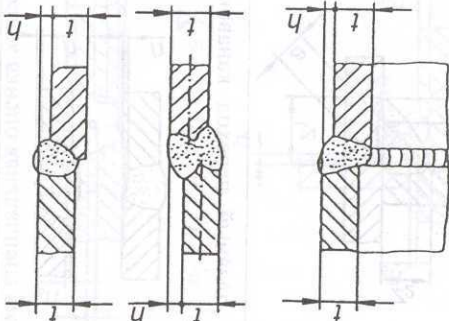
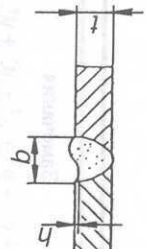
Продолжение табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
11. Подрез	<p>Необходим плавный переход канавки к основному металлу и шву</p> 	$h \leq 1,5 \text{ мм}$	$h \leq 1,0 \text{ мм}$	$h \leq 0,5 \text{ мм}$
12. Чрезмерное усиление шва	<p>Необходим плавный переход усиления шва к основному металлу</p> 	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,25b$ максимально 10 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,15b$ максимально 7 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,1b$ максимально 5 мм
13. Выпуклый шов	<p>норма реально</p> 	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,25b$ максимально 5 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,15b$ максимально 4 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,1b$ максимально 3 мм

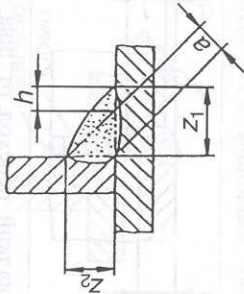
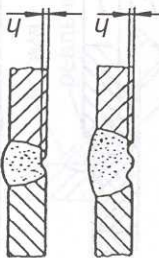

Продолжение табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
14. Угловой шов имеет большую высоту рабочего сечения	<p>Для многих применений излишняя высота рабочего сечения шва не является причиной отбраковки</p> 	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,3a$ максимально 5 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,2a$ максимально 4 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,15a$ максимально 3 мм
15. Угловой шов имеет недостаточную высоту рабочего сечения	<p>Угловой шов, имеющий недостаточную высоту рабочего сечения, не следует рассматривать как дефектный, если она скомпенсирована глубиной проплавления</p> 	Длинные дефекты: не допускаются Короткие дефекты: $h \leq 0,3 \text{ мм} + 0,1a$	Не допускаются	
16. Чрезмерный провар корня шва		максимально 2 мм	максимально 1 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,3b$ максимально 3 мм
17. Локальный выступ		$h \leq 1 \text{ мм} + 1,2b$ максимально 5 мм	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,6b$ максимально 4 мм	Допускается Случайные локальные выступы допускаются

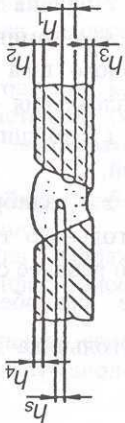
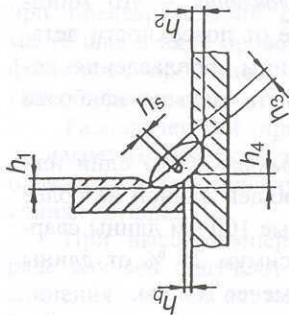
Продолжение табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
18. Смещение кромок	<p>Пределы отклонений от правильных положений. Обычно правильному положению кромок соответствует совпадение центров свариваемых деталей</p> 	$h \leq 0,25t$ максимально 5 мм	$h \leq 0,15t$ максимально 4 мм	$h \leq 0,1t$ максимально 3 мм
19. Неполномерный шов	<p>Необходим гладкий переход от шва к основному металлу</p> 	Кольцевые швы $h \leq 0,5t$		
		максимально 4 мм	максимально 3 мм	максимально 2 мм
Длинные дефекты:		не допускаются		
Короткие дефекты:		$h \leq 0,5t$ максимально 2 мм	$h \leq 0,1t$ максимально 1 мм	$h \leq 0,05t$ максимально 0,5 мм

Продолжение табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий D	средний C	высокий B
20. Асимметричный шов	Предполагается, что асимметрия не предусмотрена 	$h \leq 2 \text{ мм} + 0,2a$	$h \leq 2 \text{ мм} + 0,15a$	$h \leq 1 \text{ мм} + 0,15a$
21. Вогнутость корня шва. Коробление корня шва	Необходим плавный переход канавок в сварное соединение 	$h \leq 1,5 \text{ мм}$	$h \leq 1 \text{ мм}$	$h \leq 0,5 \text{ мм}$
22. Налпыв, натек		Короткие дефекты не допускаются	Не допускаются	
23. Плохое возобновление шва		Допускается	Не допускается	
24. Следы дуги		На возможность приемки влияет последующая обработка и свойства основного материала, в частности, чувствительность к трещинообразованию		

Окончание табл. 8.8

Название дефектов	Замечания	Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества		
		низкий <i>D</i>	средний <i>C</i>	высокий <i>B</i>
25. Брызги	На возможность приемки влияет характер эксплуатации	Максимальная суммарная высота коротких дефектов		
26. Множественные дефекты в одном сечении	<p>При толщине $s \leq 10$ мм или $a \leq 10$ мм, или меньше, необходима специальная оценка качества</p>  $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \leq \sum h$  $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \leq \sum h$	<p>0,25s или 0,25a максимально 10 мм</p>	<p>0,2s или 0,25a максимально 10 мм</p>	<p>0,15s или 0,15a макси- мально 10 мм</p>

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 законченным 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 тонким и к более толстым сварным соединениям при условии учета технических факторов, влияющих на качество сварных соединений.

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 чем 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 толщине шва.

Площадь глубины проплавления – площадь, равная произведению длины шва и глубины проплавления.

Ограничения на дефекты и их параметры согласно ИСО 5817-92 даны в табл. 8.8, в которой использованы следующие обозначения:

a – высота рабочего сечения углового сварного шва;

w – ширина усиления сварного шва (ширина проплавления);

d – диаметр поры;

h – размер (высота или ширина) дефекта;

l – длина дефекта;

s – номинальная ширина стыкового сварного шва или в случае частичного проплавления – глубина проплавления;

t – толщина стенки свариваемых деталей;

z – калибр углового шва (катет прямоугольного треугольника, представляющего рабочее сечение шва; если сечение в виде равнобедренного прямоугольного треугольника $z = a\sqrt{2}$).

Глава 9

ПАЯНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ, ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ИХ КАЧЕСТВА

9.1. ДЕФЕКТЫ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Общие сведения. Пайкой называют процесс получения неразъемного соединения материалов (стали, чугуна, стекла, графита, керамики и др.), находящихся в твердом состоянии, расплавленным припоем. При пайке происходит взаимное растворение и диффузия основного материала и припоя, заполняющего зазор между соединяемыми частями изделия.

Достоинства.

1. Возможность соединения не только однородных, но и разнородных материалов (стали со сплавами цветных металлов, металлов с графитом, фарфором, керамики с полупроводниками и т.п.).

2. Возможность соединения тонкостенных элементов, в которых применение сварки невозможно из-за опасности прожога.

3. Возможность изготовления конструкций из тугоплавких металлов (молибдена, ниобия, тантала, вольфрама), плохо поддающихся сварке.

4. Возможность распайки (разборки) без разрушения конструкции.

5. Малая концентрация напряжений вследствие высокой пластичности припоя.

6. Возможность получения соединений деталей в скрытых и труднодоступных местах конструкции.

Недостатки.

1. Необходимость малых и равномерно распределенных зазоров между соединяемыми деталями, что требует их точной механической обработки и качественной сборки.

2. Необходимость тщательной очистки поверхностей перед пайкой.

Применение.

Современные методы пайки значительно расширили технические возможности выполнения соединений. Пайку применяют при изготовлении радиаторов

в автомобилестроении, камер сгорания жидкостных реактивных двигателей, лопаток турбин, топливных и масляных трубопроводов, ядерных реакторов и др. В обшивке самолета листы из малопрочных алюминиевых сплавов заменяют паяными высокопрочными и жесткими панелями из тонких стальных листов с сотовым и гофрированным промежуточным наполнителем, паяными в термических печах.

Способы пайки.

Нагрев припоя и деталей в зависимости от их размеров осуществляют паяльником, газовой горелкой, токами высокой частоты, в термических печах и др. Для уменьшения вредного влияния окисления поверхностей деталей при пайке применяют флюсы (на основе буры, канифоли, хлористого цинка), а также паяют в вакууме или в среде нейтральных газов (аргона).

При пайке с нагревом ТВЧ или в термической печи припой укладывают при предварительной сборке деталей в месте шва в виде проволочных контуров, фольговых прокладок, лент или паст в смеси с флюсом.

Расплавленный припой растекается по нагретым поверхностям деталей и при охлаждении кристаллизуется, прочно соединяя детали.

При высокотемпературной пайке в ряде случаев получают неразъемные соединения со свойствами, близкими к свойствам основных материалов, и прочностью, превышающей прочность сварных соединений (соединения деталей из высоколегированных жаропрочных сталей).

Конструкции паяных соединений.

Пайкой соединяют листы, стержни, трубы, гнутые профили между собой или с плоскими деталями.

Паяные силовые соединения, так же как и сварные, выполняют *стыковыми*, *нахлесточными* и *тавровыми*.

На практике применяют также *телескопические* (рис. 9.1, а), *соприкасающиеся* (рис. 9.1, б, в) *соединения*, *фальцевый замок* (рис. 9.1, з).

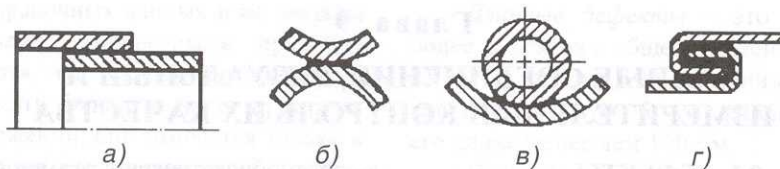


Рис. 9.1. Виды паяных соединений:

а – телескопическое соединение; б и в – соприкасающиеся соединения; г – фальцевый замок

Паяные соединения предпочтительно выполнять нахлесточными, наиболее полно использующими площадь сопряжения соединяемых деталей. Площадь перекрытия назначают так, чтобы прочность паяного соединения была равна прочности целой детали (условие равнопрочности). Стыковые и тавровые соединения имеют ограниченную площадь контакта. Для увеличения площади применяют косстыковые соединения, однако при этом трудно обеспечить требуемое взаимное расположение соединяемых частей. Стыковые и тавровые соединения применяют при действии небольших статических нагрузок.

Размер зазора в стыке определяет прочность соединения. При малом зазоре лучше проявляется эффект капиллярного течения припоя, процесс растворения материала деталей в расплавленном припое распространяется на всю толщину паяного шва (прочность образующегося раствора на 30 ... 60 % выше прочности припоя). Оптимальные зазоры при пайке деталей из стали медным припоем – 0,01 ... 0,05 мм; серебряным припоем – 0,05 ... 0,25 мм; из алюминиевых сплавов алюминиевыми припоями 0,1 ... 0,25 мм; из титана и его сплавов серебряными припоями – 0,03 ... 0,1 мм.

Припой и флюсы. Припой – металл или сплав (на основе олова, серебра, меди и др.), вводимый в зазор между соединяемыми деталями или образующийся между ними в результате диффузии в процессе пайки. Температура плавления припоя ниже температуры плавления материалов деталей.

В паяном шве происходит растворение металла деталей в расплавленном припое и взаимная диффузия элементов припоя и металла соединяемых деталей, а также возникают бездиффузионные атомные связи.

Отличие пайки от сварки – отсутствие расплавления или высокотемпературного нагрева соединяемых деталей.

К припоям предъявляют следующие требования: легкоплавкость, хорошая смачиваемость соединяемых поверхностей, достаточно высокая прочность, пластичность, непроницаемость. Коэффициенты линейного расширения материалов соединяемых деталей и припоев не должны сильно различаться.

Припой разделяют на высокотемпературные с температурой плавления $T_{пл} \geq 450^\circ\text{C}$ и низкотемпературные с $T_{пл} < 450^\circ\text{C}$.

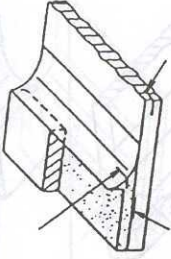
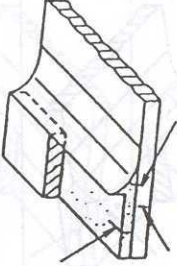
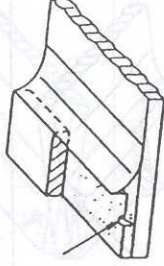
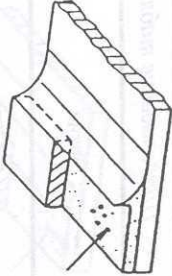
К высокотемпературным относят припой, включающие в качестве основного компонента медь, никель, серебро; к низкотемпературным – олово и свинец.

Композиционные припои состоят из нерасплавляющегося при пайке наполнителя и расплавляющихся частиц (обычно порошка никеля). Наполнитель в виде порошка, волокон или сеток выполняют из материала, близкого к основному. Припой в жидкой фазе при пайке удерживается в зазорах между частицами наполнителя под действием капиллярных сил. Это предотвращает стекание припоя при пайке изделий в любом пространственном положении.

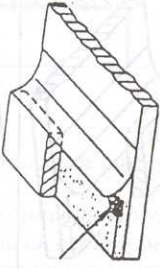
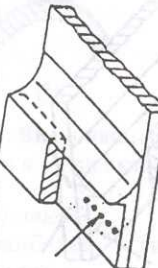
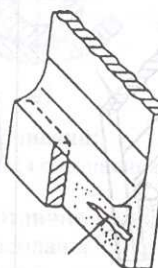
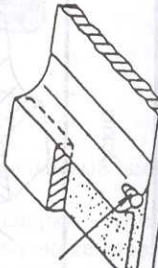
Для уменьшения влияния окисления поверхностей деталей применяют специальные флюсы, которые подразделяют на низкотемпературные (канифольные, кислотные; $T_{пл} < 450^\circ\text{C}$) и высокотемпературные (боридные, боридно-углекислые; $T_{пл} \geq 450^\circ\text{C}$).

В табл. 9.1. приведены характеристики как широко распространенных, так и редко встречающихся дефектов конструкций паяных соединений.

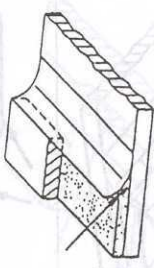
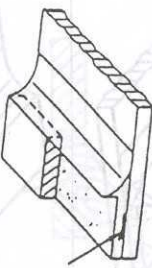
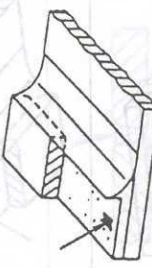
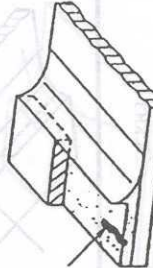
9.1. Дефекты паяных изделий

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>1. <i>Продольная трещина</i> представляет собой разрыв металла, идущий параллельно плоскости спая. Она может располагаться в шве, в основном металле (ОМ), в зоне спая (ЗС)</p>	<p>Горячие и холодные трещины в ОМ возникают под действием собственных напряжений, образующихся при сборке, нагреве под пайку, кристаллизации металла шва и охлаждения паяного изделия. Трещины в ОМ могут образоваться под действием расплавленного припоя. Образование трещин наиболее часто наблюдается в швах, спаянных припоями, имеющими широкий интервал кристаллизации, а также загрязненных примесями</p>	
<p>2. <i>Поперечная трещина</i> — это разрыв металла, идущий перпендикулярно плоскости спая. Она может возникнуть в шве, в ОМ и в ЗС</p>	<p>Трещины в ЗС часто образуются при пайке разнородных материалов с резко различными физико-химическими свойствами. Часто этот дефект образуется при пайке пластин твердых сплавов с корпусом инструментов из конструкционных сталей. Трещины возникают также при пайке серебряными или медными припоями нержавеющей сталей в напряженном состоянии</p>	
<p>3. <i>Пора и газовая раковина</i> — это шарообразная или вытянутая полость, заполненная газом</p>	<p>Этот дефект связывают с химическими реакциями, протекающими в металле, со скоплением окислов и нитридов, с газоделениями и усадочными явлениями, происходящими при переходе металла из жидкого состояния в твердое</p>	
<p>4. <i>Рассеянная пористость</i> — это разбросанные по достаточно большой области многочисленные поры и/или раковины</p>	<p>Возникновение этого дефекта связано с химическим составом сплавов, она тем больше, чем шире двухфазная зона затвердевающего сплава</p>	

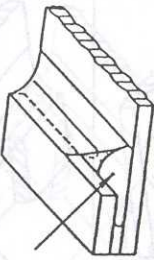
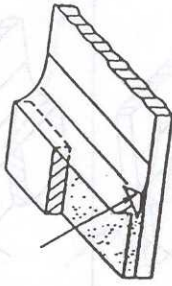
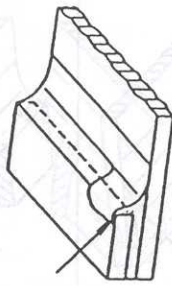

Продолжение табл. 9.1

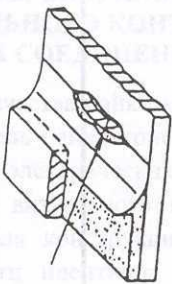


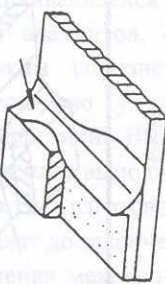
Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
5. <i>Сосредоточенная пористость</i> — это локальное скопление пор и/или раковин	Сосредоточения образуются в результате выделения из металла при кристаллизации растворенных в нем газов	
6. <i>Целочка пор</i> — это раковины, возникающие примерно по одной линии	Причиной их образования может быть выделение в процессе пайки газов, образующихся при испарении определенных компонентов припоев и флюсов	
7. <i>Пора удлинённая</i> — это заполненная газом червеобразная полость	Образуется в результате недостаточного питания соединительного зазора припоем и усадочных явлений, происходящих при кристаллизации. Возникновению способствует большой зазор	
8. <i>Пузырь (вздутие)</i> — это большое газовое включение вблизи поверхности	Причины возникновения — наличие влаги во флюсе и на заготовках припоя в виде адсорбированного локального слоя	

Продолжение табл. 9.1

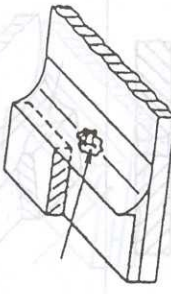
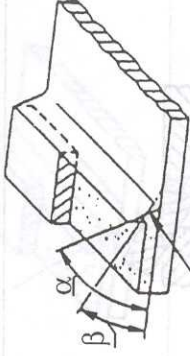
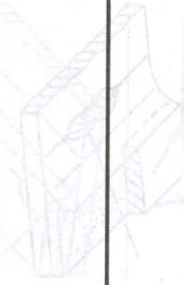
<p>Термины, определения и их морфологические признаки</p>	<p>Генетические признаки дефектов</p>	<p>Эскиз</p>
<p>9. <i>Твердотельное включение</i> — это дефект в виде поры, внутри которой имеется металлический остаток</p>	<p>Причиной образования в расплаве служит массоперенос через шлаковую пленку, находящуюся на поверхности шарообразных включений-сфероидов, в результате наличия градиента концентрации компонентов в сфероиде и ЗС</p>	
<p>10. <i>Оксидное включение</i> — это полости, заполненные оксидами, т.е. соединениями элементов с кислородом</p>	<p>Причины их возникновения связывают с химическими реакциями, протекающими в металле, со скоплениями окислов и влиянием окисной пленки. При комнатной температуре большинство оксидов твердые вещества</p>	
<p>11. <i>Включение чужеродного металла</i> — это полости, заполненные чужеродным металлом</p>	<p>В эту группу входят дефекты в виде инородных металлических частиц, попавших в ЗС механическим путем</p>	
<p>12. <i>Флюсовое и шлаковое включения</i> — это полости, заполненные флюсом или шлаком</p>	<p>Шлаковые включения образуются вследствие небрежной подготовки поверхности соединяемых элементов изделия перед пайкой, а также при слишком длительном нагреве под пайку, когда флюс, реагируя с ОМ, образует твердые остатки, которые плохо вытесняются припоем. При пайке газовой горелкой шлаковые включения могут образоваться в результате применения пламени с избытком кислорода</p>	

Продолжение табл. 9.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
13. <i>Непроял</i> — это сплошное заполнение зазора припоем. <i>Неспай</i> — т.е. отсутствие в определенных местах спая между ОМ и припоем	Непроял возникает из-за неправильного температурного режима, недостаточного затекания припоя в зазор, в результате неправильной укладки перед пайкой или недостаточного его количества, включения флюса, плохой очистки поверхности ОМ, несоблюдения требуемого зазора. Причиной неспая может быть локальное несмачивание ОМ	
14. <i>Порез</i> — это дефект поверхности в ЗС в виде углубления, расположенного по всей длине или на отдельных участках ЗС	Дефект возникает из-за неправильной настройки аппаратуры и несоблюдения технологии пайки	
15. <i>Наплыв пайки</i> — это дефект в виде напльвшего на ОМ припоя, неспаенного с ОМ	Причиной может быть небрежная пайка	
16. <i>Смещение кромок</i> — это дефект в виде параллельного смещения кромок с отклонением от заданного техническими условиями (ТУ)	Причина — смещение элементов в процессе закрепления, а также отсутствие приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию элементов изделия	

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
17. <i>Проплавление</i> – это дефект в виде сквозной несплошности в ОМ	Причина – дефекты ОМ и слишком большая выдержка при температуре пайки	
18. <i>Угловое смещение кромок</i> – дефект в виде смещения элементов изделия, при котором элементы паяного изделия соединены под углом с отклонением от заданного в ТУ	Причина – смещение элементов в процессе закрепления, а также отсутствие приспособлений, обеспечивающих надежную фиксацию элементов изделия	
19. <i>Неполномерный шов</i> – это неполное заполнение соединения припоем	Возможной причиной образования такого дефекта может быть недостаточный нагрев при пайке или недостаточное количество припоя	
20. <i>Недостаточное заполнение бокового шва припоем</i> . Часто имеет локальный характер	Причина – неравномерный нагрев или недостаточное количество припоя	

Окончание табл. 9.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>21. <i>Выход флюса на поверхностьную пору</i></p>	<p>При слишком длительном нагреве под пайку флюс, реагируя с ОМ, образует твердые остатки, которые плохо вытесняются припоем</p>	
<p>22. <i>Дефект угла наклона шва пайки</i>, при котором угол наклона углового шва к поверхности ОМ слишком велик (мал)</p>	<p>Причина — отклонение технологии пайки от оптимальной</p>	
<p>23. <i>Брызги</i> — это прилипшие к поверхности паяного соединения капли припоя</p>	<p>Причина — небрежная пайка</p>	

Продолжение табл. 9.1

9.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОЦЕДУРАХ ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Контроль качества пайки можно разделить на контроль пайки конструкции и контроль пайки электрических соединений. Процедура визуального и измерительного контроля конструкций паяных соединений почти идентична контролю сварки. Визуальный контроль паяных соединений с использованием увеличителей продолжает играть основную роль в оценке качества паяных соединений.

Качественное паяное изделие можно получить при исключительно чистых поверхностях соединяемых деталей. Непосредственно перед пайкой поверхности подвергаются соответствующей обработке для очистки от загрязнений и масел, удаления окисных пленок, а также для нанесения покрытий, облегчающих протекание процессов пайки, нанесения барьерных покрытий.

Качественный визуальный и измерительный контроль особенно необходим при оценке таких характеристик как размеры зазоров, наличие флюсов, смачивание контактов, степень заполнения зазоров припоем.

В электронной промышленности широко используется визуальный контроль отдельных электронных элементов и сложных электронных сборок для определения надежности электрических систем.

Конструкции электрических устройств со все более и более увеличивающейся плотностью расположения элементов, очень чувствительны к мелким загрязнениям, которые могут существенно ухудшить электрические характеристики. Визуальный контроль печатных плат выполняется на различных стадиях их изготовления, начиная от заготовок плат до законченных сборок с целью выявления механических и электрических перенапряжений, проверки масок проводящих и непроводящих элементов и аномалий, таких как отслоения.

Визуальный контроль необходим для обнаружения перемычек или проводящих частиц, которые могут стать перемычками и замкнуть электрическую цепь, а также для выявления повреждений мелких печатных плат, которые могут разорвать электрическую цепь.

Визуальный контроль гибридной микроэлектроники, подложек и дискретных элементов при малом увеличении зачастую выполняется с увеличением от $7\times$ до $60\times$ с помощью бинокулярного микроскопа под углом примерно 30° от перпендикуляра к поверхности подложки при соответствующем освещении объекта.

Визуальный контроль с большим увеличением микроэлектронных подложек и компонентов проводится с увеличением от $50\times$ до $200\times$. Так проводится контроль микроскопического проволочного монтажа и фоторезистивных подложек.

Глава 10

ОТЛИВКИ, ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ИХ КАЧЕСТВА

10.1. ДЕФЕКТЫ ОТЛИВОК

В процессе литейного производства заполняется литейная форма (песчано-глинистая или металлическая) расплавленным металлом, и после его затвердевания получается литая деталь – отливка. В случае необходимости ей придают точные размеры и форму последующей механической обработкой. В машиностроении около 50 % всех деталей изготавливают литьем.

Для изготовления отливок используют большой ассортимент металлов: серые и белые чугуны; бронзы, латуни, литейные алюминиевые, магниевые и цинковые сплавы; литейные тугоплавкие сплавы (на основе титана, ниобия, ванадия, молибдена, вольфрама) и др.

Основными операциями процесса получения отливок являются: изготовление модели, выполнение литейной формы, плавка металла и заливка его в формы, выбивка застывших отливок из форм, обрубка и очистка литья. Отливки преимущественно изготавливают в песчаных формах, которые являются разовыми. В комплект модельно-опочной оснастки входят модели, подмодельные, подопочные и сушильные плиты, стержневые ящики, опоки, приспособления для контроля форм и стержней и др. Форма моделей почти соответствует внешней форме будущей отливки. Модели и стержневые ящики делают цельными, разъемными, из двух и более частей и с отъемными частями, что облегчает выемку из формы и стержня из ящика. Опоки – обычно стальные, чугунные или из алюминиевых сплавов – служат для удержания формовочной смеси и образования песчаной литейной формы.

В производстве литых заготовок для деталей машин и приборов значительное

место занимают так называемые методы литья: по выплавляемым моделям, в оболочковые керамические формы, в кокиль, под давлением, центробежное литье, позволяющие получать отливки повышенной точности, с малой шероховатостью поверхности, минимальными припусками на обработку (а иногда и полностью исключаящими ее), высокими эксплуатационными свойствами. Перечисленные методы по сравнению с литьем в песчаные формы более производительны и позволяют улучшить условия труда и экологию.

Полный комплексный контроль всего процесса получения отливки, начиная с ее проектирования и кончая финишными операциями, тщательный анализ возникающих дефектов и причин, их порождающих – главное условие резкого снижения брака отливок и повышения их качества.

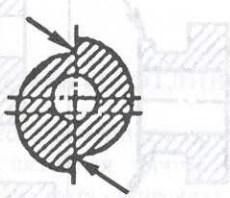
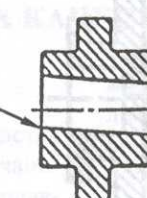

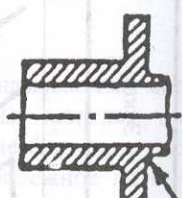
Характерные дефекты отливок из чугуна и стали представлены в табл. 10.1, а дефекты цветного литья в табл. 10.2. Последняя таблица примерно соответствует табличному материалу по дефектам, изложенному в справочнике [18]. Анализ этих таблиц показывает, что основными причинами дефектов отливок являются нетехнологичность конструкции деталей, несовершенство технологического процесса, нарушение технологии и недоброкачественность технологических материалов.

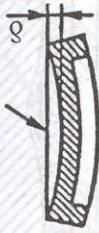
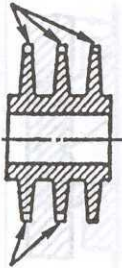
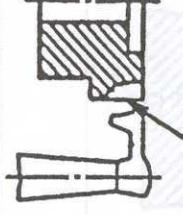
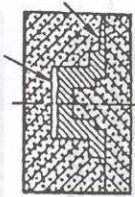

Количество и размеры допускаемых в отливках дефектов определяются техническими условиями на данный вид отливок. Для уменьшения потерь от брака технологический процесс изготовления отливок предусматривает исправление дефектов с последующим повторным контролем участков отливки, на которых они были обнаружены.

10.1. Дефекты отливок из чугуна и стали




Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>1. <i>Недолив.</i> Дефект в виде неполного образования отливки вследствие незаполнения полости литейной формы металлом при заливке</p>	<p>Основными причинами этого дефекта истинный недолив и частичное вытекание металла из формы после ее заполнения. Дефекты первого типа обычно расположены в наиболее удаленных от питателя частях отливки, а второго типа — в полостях, ограниченных тонкими стенками с острыми краями</p>	
<p>2. <i>Неслитина.</i> Дефект в виде произвольной формы отверстия или сквозной щели в стенке отливки, образовавшихся вследствие неслияния потоков металла пониженной жидкотекучести при заливке</p>	<p>Дефект характерен для сплавов с широким интервалом кристаллизации и наблюдается обычно в тонких стьках отливок</p>	
<p>3. <i>Обжим.</i> Дефект в виде нарушения конфигурации отливки, возникающей вследствие деформации формы из-за механических воздействий до или во время заливки</p>	<p>Дефект обычно образуется вблизи плоскости разреза в виде прилива или утолщения произвольной формы</p>	
<p>4. <i>Подутость.</i> Дефект в виде местного утолщения отливки вследствие расширения неравномерно или недостаточно уплотненной песчаной формы заливаемым металлом</p>	<p>Дефект может возникнуть из-за большого металлостатического давления и при заливке металла в сырые формы с недостаточной степенью уплотнения</p>	





Продолжение табл. 10.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>5. <i>Переко́с</i>. Дефект в виде смещения одной части отливки относительно осей или поверхностей другой части по разъему формы, модели или опок вследствие их неточной установки и фиксации при формовке и сборке</p>	<p>Наиболее частыми причинами переко́са является неисправность модельной или опочной оснастки, небрежность, изготовление и сборки литейной формы. Решающее значение имеет состояние фиксирующих втулок и штырей в опоках</p>	
<p>6. <i>Стержневой переко́с</i>. Дефект в виде смещения отверстия, полостей или части отливки, выполняемых с помощью стержня, вследствие его переко́са</p>	<p>В этом случае возникает также разнотолщинность – увеличение или уменьшение толщины стенок отливки</p>	
<p>7. <i>Разностенность</i>. Дефект в виде увеличения или уменьшения толщины стенок отливки вследствие смещения, деформации или всплывания стержня</p>	<p>Причины: смещение, деформация или всплывание стержня</p>	
<p>8. <i>Стержневой залив</i>. Дефект в виде затитых металлом отверстия или полости в отливке из-за непроставленного в литейной форме стержня или его обрушения</p>	<p>Часто причиной заливов является неряшливое соединение разъемных стержней</p>	



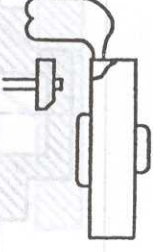
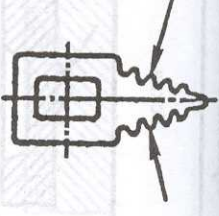
Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>9. <i>Коробление.</i> Дефект в виде искажения конфигурации отливки под влиянием напряжений, возникающих при охлаждении, а также в результате неправильной модели</p>	<p>Коробление может проявляться в различных формах, наиболее характерным является появление вогнутости или выпуклости на плоских поверхностях отливок</p>	
<p>10. <i>Незалев.</i> Дефект в виде несоответствия конфигурации отливки чертежу вследствие износа модели или недостаточной отделки формы</p>	<p>Размеры моделей или стержневых ящиков изменяются в процессе эксплуатации и хранения. Наибольший износ у моделей, поверхности которых расположены под углом 40 ... 60° к горизонтальной плоскости</p>	
<p>11. <i>Вылом.</i> Дефект в виде нарушения конфигурации и размера отливки при выбивке, обрубке, отливке литников и прибылей, очистке и транспортировании</p>	<p>Особенно опасны большие сечения питающей и прибылей. Прибыль желательнее располагать на тех частях отливки, которые впоследствии обрабатываются на металлообрабатывающих станках</p>	
<p>12. <i>Прорыв металла.</i> Дефект в виде неполной образования или неправильной формы отливки</p>	<p>Возникает при заливке вследствие недостаточной прочности формы</p>	
<p>13. <i>Уход металла.</i> Дефект в виде пустоты в теле отливки, ограниченной тонкой коркой затвердевшего металла</p>	<p>Образуется вследствие вытекания металла из формы при слабом ее креплении или недостаточной массы груза, утанавливаемого на форме</p>	

Продолжение табл. 10.1




Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>14. <i>Пригар</i>. Дефект в виде трудно отделяемого специфического слоя на поверхности отливки, образовавшегося вследствие физического и химического взаимодействия формовочного материала с металлом и его окислами. Образуется преимущественно на отливках из сплавов с высокой температурой плавления при заливке в песчаные формы</p>	<p>В зависимости от характера соединения зерен формовочной и стержневой смеси пригар делят на механический, химический и термический. Механический пригар — это слой вышеуказанной смеси, скрепленный проникшим между зернами металлом. Химический пригар — продукты реакций, протекавших между металлом и материалом формы. Термический пригар — это зерна песка, соединенные в монолитную массу легкоплавкими соединениями компонентов формовочной смеси</p>	
<p>15. <i>Слай</i>. Дефект в виде углубления с закругленными краями на поверхности отливки, образованного полностью слившимися потоками металла с недостаточной температурой или прерванного при заливке</p>	<p>Классифицируются на: а) возникающие вследствие частичного несваривания встречных потоков металла, обычно в тонких стенках отливок; б) образовавшиеся на частично затонувших твердых кристаллитах, появившихся у поверхности отливок; в) сформировавшихся внутри отливки вследствие прерывистого заполнения ее металлом</p>	
<p>16. <i>Ужжина</i>. Дефект в виде углубления с пологими краями, заполненного формовочным материалом и прилегающего к слою металла, образовавшегося вследствие отслоения формовочной смеси при заливке</p>	<p>В поверхностных слоях верхней полуформы в результате расширения смеси возникают тангенциальные силы. Когда эти силы превышают прочность смеси появляются трещины и высушенный слой формы отделяется от увлажненного слоя. В образовавшиеся трещины затекает металл</p>	

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
17. <i>Нарост</i> . Дефект в виде выступа произвольной формы, образовавшегося из загрязненного формовочными материалами металла вследствие местного разрушения литейной формы	Если в поверхностном слое верхней полуформы возникают большие трещины, то часть формы обваливается и на поверхности отливки появляется большой нарост металла	
18. <i>Залив</i> . Дефект в виде металлеского прилива или выступа, возникающего вследствие проникновения жидкого металла в зазоры по разъемам формы, стержней или по стержневым знакам	Большие заливы получаются при сильной деформации формы в процессе ее изготовления и при неряшливом соединении разъемных соединений	
19. <i>Засор</i> . Дефект в виде формовочного материала, внедрившегося в поверхностные слои отливки, захваченного потоками жидкого металла	Главная причина возникновения дефекта — разрыв литейной формы. Разрыв литейной формы уменьшается с уплотнением формы, в особенности ее поверхностного слоя	
20. <i>Плена</i> . Дефект в виде самостоятельного металлического или окисного слоя на поверхности отливки, образовавшегося при недотаточно спокойной заливке	Дефект характерен для сплавов, имеющих компоненты, склонные к повышенному окислению (алюминий, титан, хром и др.)	



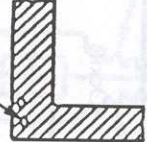
Продолжение табл. 10.1

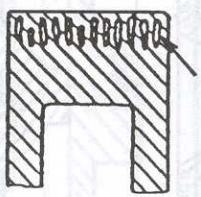
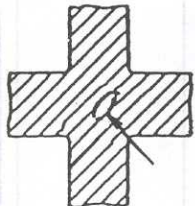
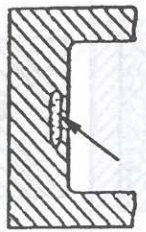
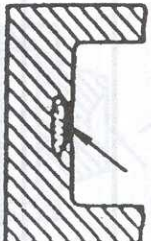
Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>21. <i>Просечка</i>. Дефект в виде невысоких прожилков на поверхности отливки, возникших вследствие затекания металла в трещины на поверхности формы или стержня</p>	<p>Образование таких дефектов на нижней поверхности формы — явление редкое</p>	
<p>22. <i>Окисление</i>. Дефект в виде окисленного слоя металла с поверхности отливки, появившийся после отжига отливок из белого чугуна на ковкий чугун</p>	<p>При отжиге отливок в воздушной атмосфере, т.е. в присутствии кислорода происходит окисление поверхности отливки. В результате такого процесса на отливке образуется кайма толщиной от нескольких десятков микрометров до 1 мм и более</p>	
<p>23. <i>Поверхностное повреждение</i>. Дефект в виде искажения поверхности, возникшего при выбивке отливки из формы, очистке, транспорте, портировании и отделении прибыли</p>	<p>Эти дефекты имеют вид поломов, вмятин, трещин и т.п.</p>	
<p>24. <i>Складчатость</i>. Дефект в виде незначительных гладких возвышений и углублений на поверхности отливки, возникающих вследствие пониженной жидкотекучести металла</p>	<p>Жидкотекучесть определяет способность расплавленного металла заполнять и точно воспроизводить полость литейной формы. Она не является чисто физическим свойством и в большей мере зависит от физико-химических свойств металла и формы</p>	

Продолжение табл. 10.1



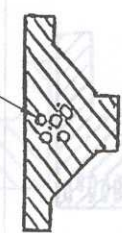

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскизы
<p>25. <i>Грубая поверхность</i>. Дефект в виде шероховатости поверхности с параметрами, превышающими допустимые значения</p>	<p>Шероховатостью называют совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами на базовой длине</p>	
<p>26. <i>Газовая шероховатость</i>. Дефект в виде сферообразных углублений на поверхности отливки, возникающих вследствие роста газовых раковин на поверхности раздела металл форма</p>	<p>Этот вид дефектов вызван, главным образом, наличием водорода и окиси углерода в металле. Если шероховатость превышает допустимые нормы, то такой дефект называют грубой поверхностью</p>	
<p>27. <i>Горячая трещина</i>. Дефект в виде разрыва или надрыва тела отливки усадочного происхождения, возникшего в интервале температур затвердевания. Горячая трещина располагается по границам кристаллов, имеет неровную окисленную поверхность, на которой иногда видны дендриты</p>	<p>Поверхность трещин сильно окислена. Эти трещины обычно возникают в толстых местах отливки или в зонах перехода от толстых к тонким сечениям, так как именно в этих местах металл продолжает длительное время находиться при высоких температурах, т.е. имеет малую прочность</p>	

Продолжение табл. 10.1





Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>28. <i>Холодная трещина.</i> Дефект в виде разрыва тела затвердевшей отливки вследствие внутренних напряжений или механического воздействия. Холодные трещины могут возникать при транспортировке, хранении и механической обработке отливок</p>	<p>Холодная трещина обычно имеет чистую светлую или с цветами побежалости зернистую поверхность. Влияние на образование холодных трещин оказывает эвтектичное превращение, при котором могут возникать напряжения, совпадающие по знаку с термическими напряжениями</p>	
<p>29. <i>Межкристаллическая трещина.</i> Дефект в виде разрыва тела отливки при охлаждении отливки в орме на границах первичных зерен аустенита в температурном интервале распада</p>	<p>Межкристаллическая трещина в изломе термически обработанной пробы (отливки) имеет вид сглаженных поверхностей с зеркальным блеском на общем сером фоне волокнистой составляющей излома и образуется под воздействием водорода, растворенного в стали</p>	
<p>30. <i>Газовая раковина.</i> Дефект в виде полости, образованной выделившимися из металла или внедрившимися в металл газами</p>	<p>Газовая раковина в отличие от усадочной имеет обычно сферическую форму и гладкую чистую поверхность</p>	

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>31. <i>Сиповидная раковина.</i> Дефект в виде удлиненных тонких раковин, ориентированных нормально к поверхности отливки, вызванных повышенным содержанием водорода в кристаллизующемся слое</p>	<p>Удлиненная форма и перпендикулярное расположение раковин к поверхности отливки объясняется ростом дендритов и их давлением на газовую фазу</p>	
<p>32. <i>Усадочная раковина.</i> Дефект в виде открытой или закрытой полости с грубой шероховатой иногда окисленной поверхностью, образовавшейся вследствие усадки при затвердевании металла</p>	<p>Дефект является следствием того, что термический коэффициент объемной усадки жидкого и кристаллизующегося металла больше, чем твердого остывающего металла</p>	
<p>33. <i>Песчаная раковина.</i> Дефект в виде полости, полностью или частично заполненной формовочным материалом</p>	<p>Часто включения представляют собой смесь песка со шлаком. Главная причина их образования — разрыв литейной формы</p>	
<p>34. <i>Шлаковая раковина.</i> Дефект в виде полости, полностью или частично заполненной шлаком</p>	<p>Дефекты чаще всего образуются в зоне питателей или в верхней части отливков. При быстром охлаждении металла или в тонкостенных отливках эти дефекты равномерно распределены по всему сечению отливки</p>	

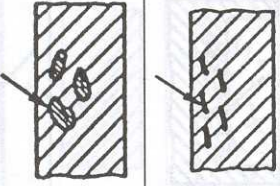
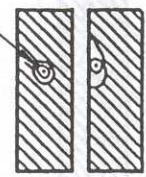
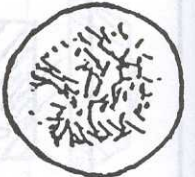
Продолжение табл. 10.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
35. <i>Залитый шлак</i> . Дефект в виде частичного наполнения литейной формы шлаком	По сравнению с чугуном сталь создает поток с большой турбулентностью, что приводит к размыву форм и затрудняет улавливание шлака	
36. <i>Графитовая пористость</i> . Дефект отливки из серого чугуна в виде сосредоточенных или паукообразных выделений графита, вызывающих неплотности металла при испытании гидравлическим или газовым давлением	Связь графита с составляющими компонентами металла очень слабая. Неравномерное изменение размеров отдельных фаз при нагреве и охлаждении уменьшают плотность графитовых включений. В эвтектических чугунах графитовые включения перекрещиваются, что сказывается на герметичности отливок	
37. <i>Усадочная пористость</i> . Дефект в виде мелких пор, образовавшихся вследствие усадки металла во время его затвердевания при недостаточном питании отливки	На начальном этапе кристаллизации кристаллы аустенита разрастаются и создают отдельные замкнутые объемы, заполненные жидким металлом. Этот металл, остывая, не имея подпитки, образует усадочную пористость, распределенную по всему объему металла	
38. <i>Газовая пористость</i> . Дефект в виде мелких пор, образовавшихся в отливке в результате выделения газов из металла при его затвердевании	Образуется, главным образом, под воздействием водорода (окиси углерода), проникающего в металл из влаги литейной формы	



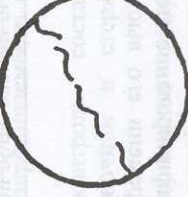
Продолжение табл. 10.1

<p>Термины, определения и их морфологические признаки</p>	<p>Генетические признаки дефектов</p>	<p>Эскизы</p>
<p>39. <i>Рыхлота</i>. Дефект в виде скопления мелких усадочных раковин</p>	<p>Объемная усадка приводит к образованию в отливках как концентрированных, рассеянных внешних, так и к скоплениям внутренних мелких усадочных раковин</p>	
<p>40. <i>Непровар жеребеек (холдильников)</i>. Дефект в виде несплошности соединения металла отливки с поверхностью жеребеек (холдильников) вследствие их загрязнения, несоответствия массы, пониженной температуры заливаемого металла</p>	<p>Включения образуются и тогда, когда установлено большое количество излишне массивных жеребеек</p>	
<p>41. <i>Вскип</i>. Дефект в виде скопления раковин и наростов, образовавшихся вследствие паробразования в местах переувлажнения литейной формы или проникновения газов из стержней в полость литейной формы</p>	<p>Подобные дефекты могут не только располагаться в теле отливки, но и выходить на поверхность</p>	
<p>42. <i>Утяжина</i>. Дефект в виде углубления с закругленными краями на поверхности отливки, возникшего вследствие усадки металла при затвердевании</p>	<p>Образуются обычно в массивных частях отливки</p>	

Продолжение табл. 10.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>43. <i>Металлическое включение</i>. Дефект в виде инородного металлического включения, имеющего поверхность раздела с отливкой</p> <p>44. <i>Неметаллическое включение</i>. Дефект в виде неметаллической частицы, попавшей в металл механическим путем или образовавшейся вследствие химического взаимодействия компонентов при расплавлении и заливке металла</p>	<p>Образуются в результате нерастворения ферросплавов, особенно с высокой температурой плавления таких, как феррохром, ферромolibден и др. Это имеет место в случае введения ферросплавов в ковш непосредственно перед заливкой</p> <p>По международной классификации такие включения разделяют на три типа: к первому относят дефекты сферической или округлой формы разных размеров с беспорядочным расположением; ко второму – вытянутой формы в виде цепочек, расположенных по границам аустенитного зерна; к третьему – игольчатые различных размеров с беспорядочным расположением</p>	
<p>45. <i>Королек</i>. Дефект в виде шарика отделившегося отливкой, и расплавленного с отливкой, образовавшегося брызгами при неправильной заливке</p>	<p>Шарики, возникающие при разбрызгивании струи металла, попадают в отдаленную часть формы, остывают, окисляются и не растворяются в металле, например, по причине высокой температуры плавления</p>	
<p>46. <i>Отбел</i>. Дефект в виде твердых, трудно поддающихся механической обработке мест в различных частях отливки из серого чугуна, вызванных скоплением структурно свободного цемента</p>	<p>Несоответствие по структуре</p> <p>Микропримеси Te, Bi, Sb и быстрое охлаждение тонких сечений отливок или поверхностных слоев способствуют отбелу</p>	

Окончание табл. 10.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
47. <i>Половинчатость</i> . Дефект в виде проявления структуры серого чугуна в отливках из белого чугуна	Причиной возникновения такой структуры является высокое содержание углерода и кремния. Дефект снижает механические свойства белого чугуна	
48. <i>Ликвация</i> . Дефект в виде местных скоплений химических элементов или соединений в теле отливки, возникших в результате избирательной кристаллизации при затвердевании	Различают внутрикристаллическую (дендритную) ликвацию, проявляющуюся в обогащении границ зерен ликвирующими элементами и образовании неравновесных структурных составляющих; зональную ликвацию – неоднородность химического состава в макрообъемах отливки; ликвацию по плотности, связанную с различием плотности жидких фаз или твердой и жидкой фаз сплава	
49. <i>Флокен</i> . Дефект в виде разрыва тела отливки под влиянием растворенного в стали водорода и внутренних напряжений, проходящего полностью или частично через объемы первичных зерен аустенита	Флокен в изломе термически обработанной пробы (отливки) имеет вид сглаженных поверхностей без металлического блеска (матового цвета) на общем сером фоне волнистой составляющей	

10.2. Дефекты цветного литья

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения и устранения
<p><i>Шлаковые включения</i> — неметаллические оксидные включения округлой формы, расположенные в теле отливки или на ее поверхности. Обнаруживаются внешним осмотром и рентгенопросвечиванием</p>	<p>Насыщенность сплава шлаками вследствие:</p> <ul style="list-style-type: none"> — применения неочищенных от масла и коррозии шихтовых материалов; — недостаточного рафинирования расплава; малого времени выстаивания расплава после рафинирования 	<p>Дробеструйная очистка шихтовых материалов.</p> <p>Тщательное рафинирование металла и соблюдение времени его выстаивания перед заливкой</p>
<p><i>Оксидные пленки</i> — включения оксидов в виде плен, рассеянных по поверхности или по всему телу отливки. Обнаруживаются внешним осмотром, особенно после обдувки дробью и оксидирования (у отливок из магниевого сплава)</p>	<p>То же, что и при образовании шлаковых включений, а при литье магневых сплавов дополнительно:</p> <ul style="list-style-type: none"> — повышенная влажность формы; — тугая набивка 	<p>То же, что и при образовании шлаковых включений, а при литье магневых сплавов дополнительно:</p> <ul style="list-style-type: none"> — соблюдение заданной влажности формы; — равномерная набивка формы
<p><i>Заплеск металла</i> — оксидная пленка, идущая в глубину отливки</p>	<p>Небрежная заливка — переливание металла через край литниковой чаши</p>	<p>Аккуратная заливка; закрыть открытые части формы (прибыли) специальными щитками</p>
<p><i>Подтек металла</i> — внешний вид сходен с заплеском</p>	<p>Поступление металла в рабочую полость формы помимо литниковой системы</p>	<p>Устранение износа модельного инвентаря; прокладка шнурового асбеста или подрезка формы ланцетом вокруг стояков и в местах возможного прорыва металла в форму помимо литниковой системы</p>
<p><i>Вскип, вскиповая раковина</i> — оксидные складки или раковины, образовавшиеся при кипении сплава. Различают вскипы со стороны формы, стержня и от холодильника</p>	<p>Большое давление газов и паров в форме вследствие высокой газотворной способности материала формы и стержней низкой газопроницаемости формы</p>	<p>Применение крепителей и защитных добавок с меньшей газотворностью. Повышение газопроницаемости формовочной смеси; устройство газоотводящих каналов в форме и стержнях</p>

Продолжение табл. 10.2

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения и устранения
<p><i>Поверхностное окисление</i> (загар, горение) — встречается (у отливки из магниевых сплавов) в виде:</p> <ul style="list-style-type: none"> — сплошной окисной пленки черного или серого цвета; — отдельных или групповых раковин, заполненных порошком черного или серого цвета; — наростов (грибков) черного цвета <p><i>Оксидный стай</i> — нарушение сплошности отливки в виде неслившихся потоков металла, разделенных пленкой. Наиболее часто проявляется в тонких сечениях отливки</p>	<p>Недостаточное количество защитных присадок в формовочной смеси и стержнях.</p> <p>Повышенная влажность стержней.</p> <p>Перегрев каналов литниковой системы</p> <p>Малая скорость заполнения формы</p> <p>Низкая температура заливки или недостаточный нагрев кокиля</p>	<p>Введение в смесь добавок и влаги в количествах, предусмотренных технологией; опрыскивание стержней противозагарным составом, например раствором борфтористого калия.</p> <p>Надлежащая сушка и подсушка стержней.</p> <p>Припыливание литниково-питающей системы смесью серы и борной кислоты</p> <p>Увеличение сечения элементов литниковой системы, изменение ее конструкции, рассредоточение мест подвода металла в форму.</p> <p>Повышение температуры заливки сплава и нагрева кокиля</p>
<p><i>Газовые раковины</i> — в теле отливки полости округлой формы диаметром 1...3 мм и более с гладкой блестящей поверхностью. Располагаются или отдельные включения, или гнездами. При литье магниевых сплавов наружные раковины имеют окисленную поверхность серого или черного цвета, при взаимодействии металла с серой раковины имеют желтую окраску. При литье тяжелых цветных сплавов раковины часто располагаются под коркой металла (подкорковые раковины) и обнаруживаются при обработке резанием</p>	<p>Низкая газопроницаемость формы и стержней.</p> <p>Повышенное содержание газовых веществ или посторонних включений (например, частичек угля) в формовочной и стержневой смеси и кокильной краске.</p> <p>Высокая влажность формы и стержней.</p> <p>Захват воздуха при заливке, большая скорость потока сплава в форме</p>	<p>Повышение газопроницаемости формы и стержней.</p> <p>Тщательный контроль состава и свойств формовочной и стержневой смесей.</p> <p>Минимально возможное содержание влаги в формовочной смеси; тщательная просушка стержней.</p> <p>Применение литниковой системы, обеспечивающей спокойное вытеснение формы и последовательное вытеснение воздуха; наклон кокиля при заливке</p>

Продолжение табл. 10.2

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения и устранения
Дефекты усадочного происхождения <i>Дефекты, образующиеся при кристаллизации отливок</i>		
<p><i>Внутренняя усадочная раковина</i> – закрытая полость в теле отливки с шероховатой поверхностью. Обнаруживается рентгенопросвечиванием.</p> <p><i>Наружная усадочная раковина (уляжина)</i> – углубление в теле отливки с гладкой поверхностью</p>	<p>Отклонение от оптимального состава сплава.</p> <p>Недостаточное питание отливки жидким сплавом вследствие несовершенства литниковой системы, приводящей к местным перегревам</p>	<p>Составление шихты по оптимальному химическому составу.</p> <p>Применение литниково-прибыльной системы, обеспечивающей последовательную кристаллизацию</p>
<p><i>Рыхлота (макрорыхлота)</i> – неплотная структура металла внутри отливки или на поверхности в виде червоточин. Размеры отдельных пустот видны визуально</p>	<p>Те же, что и при образовании усадочной раковины</p>	
То же, что и при образовании усадочных раковин и рыхлот		
<p><i>Микрорыхлота</i> – неплотная структура металла. Размеры отдельных пустот неразличимы невооруженным глазом. Обнаруживается рентгенопросвечиванием</p>	<p>Усиление микрорыхлоты, особенно у отливок из магниевых сплавов, способствует поглощению расплавленным металлом водорода</p>	<p>Применение сухих шихтовых материалов, очищенных от масла и продуктов коррозии; соблюдение оптимальных режимов плавки, тщательная дегазация сплава, применение просушенных флюсов</p>
<p><i>Газоусадочная пористость</i></p>	<p>Повышенная газонасыщенность сплава. Недостаточное питание отливки</p>	<p>Те же, что и при микрорыхлотах</p>
<p><i>Газовая пористость</i></p>	<p>Повышенная газонасыщенность сплава</p>	<p>Соблюдение рациональных режимов плавки</p>

Продолжение табл. 10.2

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения и устранения
<i>Дефекты, образующиеся в твердом или твердожидком состоянии</i>		
<p><i>Горячие и холодные трещины</i> – прямые линейные и извилистые разрывы (сквозные трещины) или надрывы (несквозные трещины) в теле отливки).</p> <p>Излом горячей трещины имеет окисленную поверхность (магового, темного или черного цвета); излом холодной – не окисленную или слабо окисленную поверхность</p>	<p>Нетехнологичная конструкция отливки (наличие острых углов, резких переходов сечений, малых радиусов закруглений).</p> <p>Неправильный выбор сплава; высокое содержание в сплаве примесей или добавок, повышающих его склонность к трещинообразованию</p>	<p>Доработать конструкцию отливки; устранить острые углы, увеличить радиусы в галтелях, создать плавные переходы от толстых сечений к тонким.</p> <p>Выбрать сплав с учетом конструкции отливки и откорректировать его химический состав</p>
<p><i>Коробление</i> – искажение геометрии и конфигурации отливки. Обнаруживается после остывания отливки в форме, выбивки и заварки</p>	<p>Неравномерное охлаждение (и усадка) отдельных частей отливки, вызывающее появление внутренних напряжений, которые превосходят предел текучести металла</p>	<p>Применение мер, описанных выше для предупреждения трещин</p>
<i>Дефекты – неметаллические включения в отливке, не вызываемые взаимодействием с газами и влагой</i>		
<p><i>Флюсовые крупные включения</i> – раковины в теле отливки каплеобразной формы, заполненные флюсом, часто сопровождающиеся включениями шлака.</p>	<p>Применение флюса, не соответствующего принятому методу плавки, или применение некачественного флюса.</p>	<p>Применение качественного флюса, соответствующего принятому методу плавки.</p>
<p><i>Флюсовые мелкие включения</i>, проявляющиеся при вылеживании отливок в виде темных точек и пятен</p>	<p>Нарушение режимов рафинирования и отстаивания металла в тигле</p>	<p>Соблюдение правил обработки расплава в печи и раздаточном тигле</p>

Продолжение табл. 10.2

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения и устранения
<p><i>Песчаный зазор</i> — открытая или закрытая раковина в теле отливки неправильной формы, полностью или частично заполненная формовочным материалом</p>	<p>Несоблюдение общих правил изготовления и сборки литейных форм</p>	<p>Употребление формовочных и стержневых смесей с достаточной прочностью в сыром состоянии; равномерная набивка и аккуратная сборка форм; уменьшение продолжительности выстывания собранной формы перед заливкой</p>
<p><i>Ужимки</i> — длинные узкие вмятины в теле отливки. Наслоения металла, отделенные прослойкой формовочной смеси (при литье в песчаные формы) или прослойкой краски (при литье в кокиль)</p>	<p>Нарушение технологии приготовления формовочной смеси. Неравномерное уплотнение формы, вызывающее неравномерное расширение слоев формы при заполнении ее металлом</p>	<p>Тщательное перемешивание формовочной смеси. Равномерная набивка песчаной формы</p>
<p><i>Пригар</i> — неравномерные утолщения из формовочной или стержневой смеси, пропитанные металлом, располагающиеся в местах ее соприкосновения с наиболее горячими участками формы</p>	<p>Крупнозернистый песок и слабая набивка формы; низкая огнеупорность (для медных сплавов) формовочной и стержневой смесей. Повышенный напор сплава при заливке</p>	<p>Равномерная набивка формы, применение мелкозернистых формовочных песков с огнеупорными и противогарными добавками. Уменьшение гидравлического напора сплава при заливке</p>
<p><i>Королек</i> — металлическое включение того же состава, что и отливка. В большинстве случаев включение полностью окружено металлом</p>	<p>Неправильный режим заливки отливки (перерыв струи, выбросы и разбрызгивание металла и т.д.)</p>	<p>Соблюдение общих правил заливки форм, исключающих перерыв струи, разбрызгивание металла, попадание металла из ковша в прибыли и выпоры</p>
<p><i>Брак по химическому составу</i></p>	<p>Неправильная шихтовка или неточное определение химического состава сплава</p>	<p>Улучшение методики шихтовки оптимального химического сплава; проведение экспресс-анализа и подшихтовка сплава</p>

Окончание табл. 10.2

Дефект	Причины возникновения	Меры предупреждения и устранения
<i>Ликвация</i> — неоднородность химического состава сплава в разных точках отливки	Плохое перемешивание жидкого сплава, склонного к ликвации; длительное выстаивание сплава перед заливкой	Тщательное перемешивание сплава перед заливкой и сокращение времени выдержки
<i>Отклонение физико-механических свойств отдельно отлитых или вырезанных из отливки образцов от требований стандарта</i>	Нарушение технологии приготовления сплава, приводящее к наличию оксидных включений и плохому модифицированию сплава	Соблюдение технологии плавки, рафинирования, модифицирования и заливки
<i>Отклонение микроструктуры по виду, количеству и величине структурных составляющих от требований стандарта</i>	Нарушение технологии термической обработки: — заниженная температура нагрева, приводящая к неполной закалке	Уточнение и строгое соблюдение режимов термической обработки. Проверка исправности работы оборудования для термической обработки
<i>Несоответствие размеров и конфигурации отливки чертежу. Обнаруживается внешним осмотром и разметкой отливки</i>	Неправильно учтена величина усадки сплава при изготовлении модельного комплекта (кокиля). Несоответствие размеров знаков на модели и в стержневом ящике; отсутствие фиксаторов	Уточнить величину усадки сплава и материала металлической формы. Проверка точности изготовления модельного комплекта
<i>Несоответствие герметичности отливки техническим требованиям чертежа. Отливки не выдерживают испытания на герметичность</i>	Повышенная пористость и усадочная рыхлота. Неправильно подобран тип сплава	Устранить пористость и усадочную рыхлоту. Заменить сплав на более герметичный

Основными способами исправления дефектных отливок является заварка, заделка эпоксидными компаундами, пропитка герметизирующими материалами, а также установка различных заглушек, пробок и втулок.

10.2. ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ЛИТЬЯ

Качество отливок формируется на всех этапах производства, начиная с проектирования отливок и их технологической разработки. Технолог, который правильно расположил отливку в форме, сконструировал литниковую систему с холодильниками, питателями и т.п., т.е. создал условия для направленной кристаллизации, обеспечивает получение качественной отливки.

Не меньшее значение для получения качественных отливок имеют правильно выбранные параметры технологического процесса: температура и скорость заливаемого металла, составы формовочных и стержневых смесей, режим термической обработки и т.д.

Повышение требований к качеству отливок по составу, структуре связано с требованиями к исходным материалам. Особая требовательность должна предъявляться к материалам металлизаливки — чугуну, ферросплавам, металлическому лому и т.д. То же самое относится к контролю формовочных и стержневых смесей; противопожарных материалов.

Последовательность операций контроля зависит от специфики производства, сложности отливок и требований, предъявляемых к качеству продукции [19].

Для проведения технического контроля в литейном цехе выделяются специальные помещения: площадки для наружного осмотра отливок, разметочные пункты для проверки соответствия геометрии отливок чертежу и т.п.

В литейных цехах и отделениях применяется в основном система общего освещения.

Местное освещение необходимо на столах ручной формовки стержней и их визуального контроля, а также на местах технического контроля литья при определении качества и геометрии отливок, при этом нормы освещенности и качественные показатели освещения должны соответствовать шкале освещенности IIIa (см. табл. 3.2).

Последовательность контроля непосредственно отливок обычно включает следующие виды их контроля по этапам: нулевой, предварительный, подетальный и окончательный.

Нулевой контроль осуществляется непосредственно после удаления отливки из формы.

По опытным данным, мелкие чугунные отливки можно извлекать из формы при 700 ... 900 °С, средние — при 400 ... 500 °С.

В современных литейных цехах выбивку производят с помощью механизмов и установок.

Мелкие и средние отливки часто выбивают на вибрационных решетках. Стержни из крупных отливок удаляют в гидравлических камерах струей воды диаметром 5 ... 15 мм под давлением до 10 МПа (100 атм). При этом происходит и очистка поверхности отливок от частиц приставшей формовочной смеси.

На этом этапе путем визуального осмотра можно выявить достаточно крупные (явные) дефекты типа (см. табл. 10.1): недолив (п. 1), подутость (п. 4), перекос (п. 5), стержневые заливы (п. 8), уход металла (п. 13), нарост (п. 17) и др. В процессе нулевого контроля отливки сортируют по внешним признакам на годные и бракованные.

Предварительный контроль осуществляется после удаления литниковой системы и очистки отливок методами визуального и измерительного контроля и более детально рассмотрен ниже. Следует учитывать, что при отделении от отливок литниковой системы могут возникать их

механические повреждения. Обрубку, т.е. удаление литников, прибылей и дефектов, обычно проводят на дисковых или ленточных пилах, газовой или электродуговой резкой, пневматическими зубилами и т.п.

Очистку мелких отливок от остатков формовочных материалов осуществляют во вращающихся барабанах круглого или прямоугольного сечения.

В гидropескоструйных установках отливки очищают струей воды с песком под давлением до 3 МПа (30 атм).

Дробеметная и дробеструйная очистка заключается в том, что поверхность обрабатывают струей чугуновой или стальной дробы, выбрасываемой со скоростью 60 ... 70 м/с из вращающейся дробеметной головки.

После очистки отливок от формовочной смеси визуально становятся явными даже мелкие дефекты типа недоливов, перекосов, заливы, подутость, борозды, гребешки, усы и т.п. (см. табл. 10.1).

При контроле отливок широко используют оптические приборы, дающие полное изображение проверяемой зоны близко расположенных поверхностей (лупы), внутренних областей (гибкие и жесткие эндоскопы), далеко расположенных поверхностей (телескопические лупы, бинокли).

Размерная точность определяется степенью приближения истинных (действительных) размеров отливки к размерам, указанным на чертеже (номинальным размерам).

Способы контроля размерной точности отливок можно объединить в три группы: измерение действительных размеров, проверка соответствия действительных размеров допустимым предельным и контроль отливок разметкой.

Измерение действительных размеров применяется главным образом при изготовлении единичных отливок и производится универсальным инструментом.

Проверка соответствия действительных размеров допустимым предельным применяется в крупносерийном и массовом производстве и осуществляется

измерительным инструментом, который выполняется по принципу предельных калибров (скобы, щупы, кольца, пробки и т.п.).

Контроль отливок разметкой заключается в перенесении на отливку чистовых размеров готовой детали (в соответствии с чертежом, он проводится при запуске в производство новых модельных комплектов или их дублеров, новой металлической оснастки (кокилей, прессформ и т.п.), а также после их капитального ремонта).

Для некоторых отливок состояние поверхности является одним из существенных показателей качества.

Практика литья в различные формы показывает, что даже при использовании прецизионных способов, не удается получать поверхности отливок с параметрами шероховатости менее $Ra = 0,63$ мкм. Поэтому при выборе параметров для оценки качества литых поверхностей следует отдавать предпочтение параметру Rz (табл. 10.3).

Следует иметь в виду, что поверхность отливки при удовлетворительном ее общем состоянии может иметь участки, резко различающиеся по шероховатости вследствие появления дефектов (пригар, окисление, повреждение поверхности и т.п.). Поэтому при контроле шероховатости поверхности влияние дефектов должно быть исключено, так как по ГОСТ 2789-73 (в ред. 1980 г.) требование к шероховатости поверхности на дефекты не распространяется.

Подетальный технологический контроль включает как правило, контроль отливки такими методами неразрушающего контроля как ультразвуковой, рентгеновский, магнитный и т.д.

Окончательный контроль осуществляется после прохождения всех контрольных операций на основе анализа сопроводительной документации.

В процессе окончательного контроля проверяется наличие на отливке клейм о предыдущих контрольных операциях, проводится анализ на соответствие результатов контроля допустимым нормам.

10.3. Шероховатость поверхностей отливок, полученных различными способами литья

Способ литья	Наибольший размер отливки, мм	Rz, мкм, поверхности отливки		
		Цветные сплавы с температурой плавления ниже 700 °С	Цветные сплавы с температурой плавления выше 700 °С, серый чугун	Ковкий, высокопрочный и легированный чугуны, сталь
Под давлением	До 100	1,6 ... 6,3	3,2 ... 12,5	6,3 ... 20,0
	Св. 100	3,2 ... 12,5	6,3 ... 20,0	10,0 ... 20,0
В керамические формы, по выплавляемым моделям	До 100	3,2 ... 12,5	6,3 ... 25,0	10,0 ... 32,0
	Св. 100	6,3 ... 25,0	10,0 ... 32,0	12,5 ... 40,0
В кокиль и под низким давлением, металлические формы без песчаных стержней и с ними, в песчаные формы, отверждаемые в контакте с оснасткой	До 100	10,03 ... 20,0	16,0 ... 32,0	20,0 ... 40,0
	Св. 100 до 630	16,0 ... 20,0	20,0 ... 40,0	25,0 ... 50,0
	Св. 630	20,0 ... 40,0	25,0 ... 50,0	32,0 ... 63,0
В песчаные формы, отверждаемые вне контакта с оснасткой, в сырые и сухие песчаные формы	До 630	40,0 ... 80,0	50,0 ... 100,0	63,0 ... 125,0
	Св. 630 до 4000	50,0 ... 100,0	63,0 ... 125,0	125,0 ... 200,0
	Св. 4000	63,0 ... 125,0	125,0 ... 200,0	Св. 200,0

Количество и размеры допускаемых в отливках дефектов определяются техническими условиями на данный вид отливок. На ряд ответственных отливок общего машиностроения (головки, блоки, гильзы цилиндров и т.п.) разработаны специальные ГОСТы, в которых установлены допустимые нормы по дефектности отливок, указаны механические характеристики и т.п.

Наиболее распространенными методами исправления дефектных отливок являются пропитывание пористых отливок различными составами и заварка дефектов газовой или электродуговой сваркой а также установка различных заглушек, пробок и втулок. Пористые отливки, работающие под небольшим давлением, пропитывают водным раствором хлористого аммония (нашатыря). Нашатырь за

8 ... 12 ч проникает между кристаллами металла, образуя окислы, и тем самым закупоривает поры отливки.

Пористость чугунных, бронзовых и алюминиевых литых деталей, работающих под значительным давлением, устраняют путем запрессовки в поры бакелитового лака.

Для газовой или электрической дуговой заварки присадочный пруток или электрод должен иметь тот же химический состав, что и основной металл.

На все отливки, подвергнутые предварительному контролю, выписывается сопроводительный документ, в котором отмечаются результаты контроля. Контроль отливок после заварки осуществляется аналогичным образом, при этом в сопроводительном документе должно отмечаться качество заварки.

ДЕФЕКТЫ, ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

11.1. ДЕФЕКТЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

Изделиям, которым была придана соответствующая форма и обеспечены требуемые размеры, часто требуется чистовая обработка поверхности для оптимального выполнения ими своих функций.

Современная техника требует от металлических покрытий не только выполнения защитных функций — одновременно они должны обладать определенной прочностью и износостойкостью, электропроводимостью или электросопротивлением, магнитными свойствами, способностью к пайке и другими функциональными свойствами.

Для удовлетворения объективных вышеуказанных потребностей используют множество видов поверхностной обработки, например, разнообразные методы очистки, применение органических и металлических покрытий. Некоторые из них влекут за собой ее химическое изменение, влияющее на свойства поверхности. Ниже в сжатой форме рассмотрены несколько способов нанесения металлических покрытий и их дефекты.

Металлизация распылением металла в атмосфере. При этом способе металлический провод или порошок подается в ацетиленовое пламя и затем, после расплавления, переносится потоком воздуха, подаваемого с большой скоростью, на поверхность детали. Небольшие капельки прилипают к поверхности и соединяются вместе, образуя покрытие. Если между металлами существует достаточное сродство, то соединение металлов может быть выполнено по типу сварного соединения, т.е. с образованием атомных связей. Цинк,

алюминий, кадмий, которые по отношению к стали, являются анодными материалами, обеспечивают последней коррозионную защиту и обычно напыляются тонкими слоями со средней толщиной покрытия 0,25 мм.

Покрытия из олова, свинца и никеля (катодные материалы по отношению к стали) имеют толщину покрытия в два и больше число раз, превышающую вышеуказанную толщину. Катодные металлы защищают сталь только от воздействия на нее окружающей среды.

Вакуумная металлизация. При использовании этого способа металл испаряется в камере с высоким вакуумом, в котором помещены детали, подлежащие покрытию. Испаряемый металл конденсируется на поверхностях деталей в виде тонкого покрытия. Наиболее часто при этом способе в качестве испаряемого металла используется алюминий.

Покрытие погружением. Некоторые металлы, главным образом, цинк, олово и свинец, наносятся на сталь для коррозионной защиты методом горячего покрытия погружением.

Способ диффузионного нанесения цинка состоит в том, что сталь нагревается в контакте с цинковой пылью.

Гальванические покрытия. Это покрытие обеспечивает в тех или иных условиях защиту от коррозии, улучшение внешнего вида изделия, усиление износостойкости и является промежуточным при нанесении многослойного покрытия.

Наиболее часто используются такие покрывные материалы как медь, никель, хром, кадмий, цинк, олово, серебро и золото. Толщина такого покрытия обычно выбирается в диапазоне от 2,5 до 25 мкм.

Общие понятия по некоторым дефектам (согласно DIN 50903, Германия), относящимся к металлическим защитным покрытиям, даны в табл. 11.1. ИСО 10308 классифицирует типы пор (рис. 11.1), наиболее часто встречающиеся при электролитическом нанесении покрытий.

Статистика видов брака по защитным покрытиям показывает, что примерно до 70 % всего брака связано с плохим качеством подготовки поверхности к покрытию.

Подготовка поверхности к покрытию разделяется на два этапа.

Первый заключается в точном соблюдении того класса чистоты поверхно-

сти, который предусмотрен чертежно-технологической документацией для каждой детали. Обычно гальваническое покрытие только повторяет, копирует микрогеометрию покрываемой поверхности и даже несколько ухудшает ее, увеличивая мельчайшие неровности и шероховатости, как это схематически показано на рис. 11.2. Поэтому всякие дефекты механической подготовки, например: заусенцы, шлаковые волосовины, участки с удаленной окалиной и т.д. – остаются и после покрытия, но становятся более заметными на светлом фоне покрытия, а главное – являются причиной дефектов.

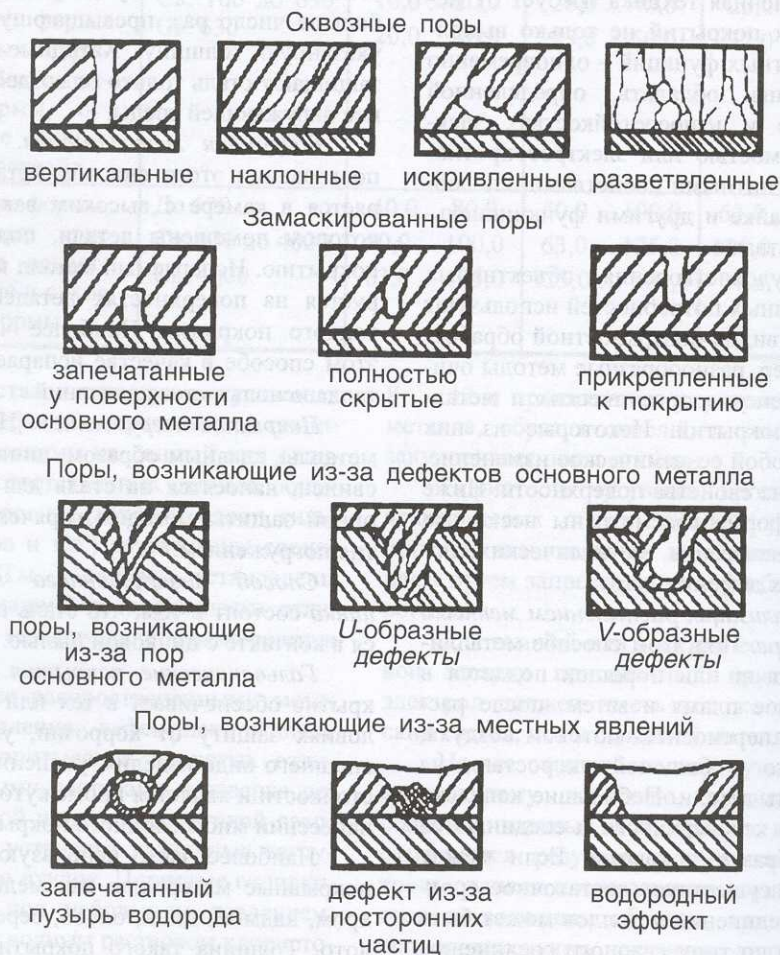
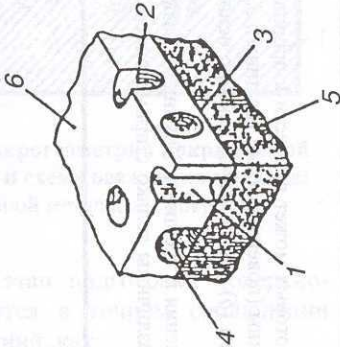
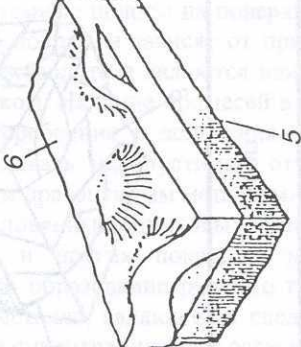
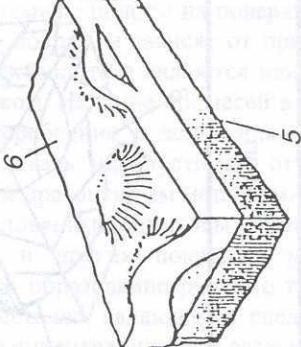
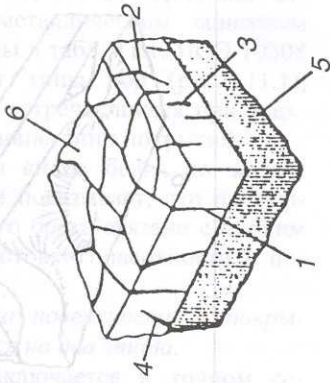


Рис. 11.1. Классификация типов пор по ИСО 10308

11.1. Дефекты металлических защитных покрытий

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>1. <i>Поры</i> – это дефекты в виде несплошности, преимущественно объемного характера, но заполненные твердыми или жидкими веществами. Например, водородная пористость покровного слоя меди (питтинг)</p>	<p>При никелировании, меднении загрязнение электролита органическими веществами (столярный клей, декстрин, поливовочная паста)</p>	
<p>2. <i>Включения</i> – это дефекты в виде несплошности, преимущественно объемного характера, заполненные твердыми или жидкими веществами. Поры и включения могут примыкать друг к другу или переходить одно в другое</p>	<p>Включения белого, цвета из-за недоброкачественной промывки после цинкования. Возможно образование зеленых гидратов окиси никеля при никелировании из-за высокого значения pH и чрезмерно высокой катодной плотности тока</p>	
<p>3. <i>Пузыри</i> – это дефекты в виде пор или включений, связанные с выпучиванием поверхности покрытия</p>	<p>При цинковании и свинцовании возможны причины их образования: недоброкачественная подготовка к покрытию, большой наклеп при механической обработке, насыщение водородом покрываемого металла</p>	

Окончание табл. 11.1

Термины, определения и их морфологические признаки	Генетические признаки дефектов	Эскиз
<p>4. <i>Трещины</i> – это дефекты типа разрывов преимущественно двухмерного характера. Ограничивающие поверхности трещин часто располагаются перпендикулярно к поверхности покрытия.</p>	<p>При железнении: низкая температура электролита, завышенная плотность тока на катоде, плохая подготовка к покрытию</p>	
<p>Примечания. 1. Обозначения на эскиза : 1 – сквозные поры и трещины простирающиеся от поверхности до основного металла, наличие которых может привести к проникновению агрессивных веществ непосредственно к основному металлу; 2 – открытые поры (ямки) и трещины (поверхностные трещины); 3 – 4 – закрытые (скрытые) поры и трещины. Они или со всех сторон ограничены металлическим покрытием (6) или граничат также с основным металлом; 5 – основной металл; 6 – металлическое покрытие.</p> <p>2. По практическим изображениям различают крупные, мелкие и микроскопические поры, включения и трещины. Крупными называют такие, которые при нормальном зрении различимы на стандартном расстоянии 250 мм. Мелкие – различимы только с применением лупы (увеличение до 6^x). Микроскопические – различимы при увеличении выше 6^x.</p>		

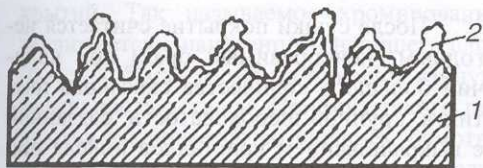


Рис. 11.2. Микрогеометрия покрываемой поверхности и схема осаждения металла:

1 – основной металл; 2 – покрытие

Второй этап подготовки поверхности заключается в точном соблюдении таких требований, как:

1) удаление с поверхности неметаллических включений и прочих поверхностных дефектов (вмятин, забоин и т.п.);

2) обезжиривание и протравливание поверхности металла;

3) установку покрываемых поверхностей параллельно анодам;

4) соблюдение температурно-временного режима технологического процесса нанесения покрытия.

Важным для качества покрытия является также строгая приемка гальванического оборудования, химикатов и анодов.

Приемку гальванических покрытий производят по таким показателям как:

1) состояние поверхности (внешний вид);

2) сплошность и степень пористости;

3) толщина слоя (слоев) покрытия;

4) прочность сцепления покрытия с основным металлом или подслоем.

При этом доброкачественность покрытий определяется обязательным наличием всех четырех показателей одновременно.

Общим требованием, относящимся ко всем видам покрытия, является соблюдение указаний на чертеже о наличии покрытия на заданных участках и отсутствии его на участках, не подлежащих покрытию (посадочные плоскости, резьбовые поверхности высших классов и т.д.), а также выполнение указаний о допустимости наличия или отсутствия покрытия на особо оговоренных участках.

Важным показателем является нормальный цвет осажденного металла. Так, например, темные полосы на поверхности никелевого покрытия зависят от примеси цинка в электролите и являются неисправимым браком. Наличие примесей в электролитах серебрения и золочения также может придавать недопустимые оттенки осажденным драгоценным металлам.

Для оловянных, цинковых, медных, кадмиевых и других покрытий может иметь место образование рыхлого губчатого слоя металла, являющееся следствием низкой концентрации соли осаждаемого металла и чрезмерно высокой плотности тока, а также других нарушений нормального состава и режима. Такие дефекты могут фиксироваться только путем внешнего осмотра покрытия и считаются недопустимыми.

Чрезмерно высокая плотность тока приводит к бурному росту кристаллов металла на углах, ребрах и острых кромках деталей. Эти кристаллы образуют наросты с ветвистой структурой, так называемые дендриты. Они легко осыпаются или скалываются с деталей, обнажая основной металл. Это явление имеет место при осаждении металлов, но особенно часто наблюдается при хромировании, цинковании и никелировании. Такой вид брака считается неисправимым.

Шероховатость, игольчатость, крупнокристалличность покрытий обычно характерны для оловянных, цинковых, хромовых и железных покрытий и наблюдаются при отсутствии коллоидных добавок, при низком содержании свободных кислот и других нарушениях состава электролитов.

Неожиданно появляющимся браком в покрытиях внешнего вида является крупная водородная пористость или так называемый питтинг. Сущность его заключается в том, что пузырьки водорода, выделяющиеся совместно с осаждаемым металлом на поверхности изделий, не всплывают на поверхность электролита, достигнув критической величины, а зародившись в отдельных точках поверхности,

прилипают к этим точкам, изолируя их от наращивания металла.

В результате на месте пузырьков образуется впадина с приподнятыми краями и с зеркально-гладкими стенками. Иногда пузырьки водорода медленно скользят по вертикально расположенным стенкам деталей, образуя характерные дорожки, или имеют грушевидную форму с обращенным кверху конусом. Питтинг может быть несквозным, может доходить до основного металла, но во всех случаях он приводит к окончательному браку в покрытии. Наиболее часто это явление наблюдается при никелировании и обычно связано с загрязнением электролита органическими коллоидными примесями.

Визуальный контроль покрытия проводится на деталях, которые отбирают в установленном количестве от каждой партии деталей, выгруженных из ванн. Обычно для осмотра крепежа и мелких деталей, покрываемых в колоколах или барабанах, отбирают детали, 5 ... 10 % от загрузки; крупные же детали подвергаются осмотру все. Освещенность деталей в процессе приемки должна быть в пределах 300 ... 600 лк при обязательном наличии только рассеянного дневного или искусственного света.

В ночные смены стол приемки должен быть освещен лампами дневного света, не дающими искажения оттенков покрытий. При отсутствии таких ламп они могут быть заменены обычными, но с молочным или матовым стеклом.

Приемку деталей по внешнему виду производят путем их осмотра невооруженным глазом при удалении от глаза на 40 ... 50 см.

Приемка по внешнему виду имеет большое значение для группы защитно-декоративных покрытий: никеля, меди и хрома.

Приемку *никелированных* деталей по внешнему виду производят двукратно: после сушки деталей перед полированием, а также после полирования.

После сушки покрытие считается негодным (неисправимый брак) при наличии большого количества сквозного питтинга, крупной шероховатости, связанной с выкрашиванием кристаллов никеля при полировании, трещин, дендритных наростов на кромках деталей, черных полос и пятен, следов прижога от короткого замыкания тока, непокрытых участков, глубоких рисок и царапин и прочих дефектов, ухудшающих внешний вид и качество покрытия.

Отражательная способность никелевых покрытий после механического полирования не превышает 66 %, а после электролитического – 70 %. Никелевые покрытия, полученные из электролитов блестящего никелирования, имеют эту величину в пределах 65 ... 68 %.

После полирования к негодным относятся покрытия, имеющие:

- участки, прополированные до обнажения основного металла или подслоя;
- глубокие царапины и риски, нарушающие целостность покрытия;
- дефекты, выявленные при полировании: вздутия, трещины, хрупкость, скрытая пористость.

Требования к приемке *медных покрытий* зависят от назначения самого покрытия. Так, если меднение применяют для создания подслоя в защитно-декоративных покрытиях медь – никель – хром, то приемку медного подслоя проводят лишь путем внешнего осмотра на полноту покрытия заданных участков, отсутствие дендритов, а на полированных поверхностях – на отсутствие прополированных участков.

Приемка *хромовых покрытий* также определяется назначением хрома. Твердые хромовые покрытия, наращиваемые в целях восстановления размеров и повышения износостойкости, осадки молочного хрома для защиты от коррозии, слой хрома с пористой сеткой для деталей, эксплуатируемых в условиях трения со смазкой, относятся к группе специальных по-

крытий. Так называемое хромирование заключается в нанесении тончайшего слоя (0,1 ... 0,5 мк) хрома на никелированную поверхность деталей. Приемка такого покрытия заключается во внешнем осмотре на отсутствие непокрытых участков, вздутий и отслаивания, а также на равномерность блеска. При наличии указанных дефектов необходимо удалить хром, так как при указанной толщине слоя исправление этих дефектов невозможно.

Допускаются высохшие потеки воды, отсутствие хрома в отверстиях диаметром до 8 мм, и незначительная шероховатость на острых кромках деталей.

Приемку деталей после гальванического *цинкования и пассивирования*, а также деталей, *кадмированных и пассивированных*, производят по следующим признакам:

- поверхность деталей после покрытия и пассивирования должна иметь радужный оттенок без ограничения цветов;

- на поверхности деталей допускаются высохшие водяные потеки и незначительная шероховатость покрытия на острых кромках;

- не допускается отсутствие покрытия и пассивной пленки на участках, подлежащих покрытию, а также следы неотмытых солей и коричневые потеки и пятна засохшего пассивирующего раствора.

Гальванические покрытия *оловом, свинцом* и различными *свинцово-оловянными сплавами* применяются для различных технических целей, не имеют декоративного значения, за исключением покрытия "кристаллит", и приемка их производится по следующим общим требованиям:

- на поверхности покрытых деталей допускается наличие блестящих и матовых участков и различных оттенков покрытия, а также неотмываемые водяные потеки;

- не допускаются игольчатые, дендритообразные и губчатые осадки неотмытых солей.

Приемка серебряных деталей и изделий определяется назначением покрытия.

11.2. ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ БЕЗ ИХ РАЗРУШЕНИЯ

Важным требованием большинства стандартов на покрытия является то, что они должны иметь толщину не менее заданного значения, а в некоторых случаях — не более. Единственным практическим определением минимальной толщины является местная толщина на заданной площади.

Для изделий с рабочей поверхностью менее 1 см² контрольной площадью для определения местной толщины покрытия должна быть вся рабочая поверхность. Для изделий с рабочей поверхностью более 1 см² местную толщину определяют в пределах контрольной площади примерно 1 см². В пределах контрольной площади может быть проведено до пяти измерений.

Неразрушающие методы измерения толщины покрытия можно применять только в том случае, если шероховатость поверхности основного материала и покрытия меньше, чем толщина покрытия.

Для установки и регулировки приборов контроля должны применяться сравнительные эталоны, магнитные, электрические и геометрические характеристики которых совпадают с соответствующими характеристиками основного материала с покрытием.

Для очистки поверхности ОК не допускается применять средства, которые могут изменить толщину покрытия.

Обезжиривание проводят подходящим органическим растворителем, техническими моющими средствами, венской известью или окисью магния. Окисные слои на поверхности металлических покрытий удаляют механической полировкой с применением водной суспензии окиси алюминия. Хроматные слои на цинковых и кадмиевых покрытиях удаля-

ют протиркой ватой, смоченной 5 %-ым водным раствором уксусной кислоты или водным раствором соляной кислоты 1:7. Слой декоративного хромового покрытия толщиной до 1,5 мкм, перед определением толщины многослойных покрытий, удаляют путем погружения образца в водный раствор соляной кислоты 1:1 при температуре 50 ... 60 °С. Пассивирующий слой на никелевых покрытиях удаляют путем погружения образца в водный раствор соляной кислоты 1:1.

Очищенный образец промывают водой и высушивают фильтровальной бумагой или теплым воздухом.

Существующие способы измерения толщины гальванических покрытий можно классифицировать следующим образом:

- измерение толщины микрометром;
- измерение магнитными, магнитоиндукционными и вихретоковыми толщиномерами;
- измерение толщины радиационными методами.

Измерение толщины покрытий микрометром. Измерение толщины гальванически осажденных покрытий микрометром является старейшим, широко распространенным и наиболее точным способом.

Измерение толщин покрытий микрометром пригодно для всех видов гальванических покрытий, включая покрытия металлами с низкой твердостью, но ограничено конфигурацией изделий. Такой способ применяется для деталей, имею-

щих параллельные плоскости, для всех размеров круглых сечений, для листового металла и т.д., но не может быть использован для изделий неправильной формы и для очень крупных деталей.

Измерение магнитными, магнитоиндукционными и вихретоковыми толщиномерами. Магнитные толщиномеры основаны на измерении приращения индукции магнитного поля в зазоре, обусловленном толщиной защитного слоя, между постоянным магнитом и ферромагнитной поверхностью. Как правило, такие толщиномеры используются для измерения толщины защитного слоя на трубах газо-нефтепроводов, а также в нефтехимической промышленности при определении толщины футеровки из титановых или нержавеющей сталей внутренних поверхностей сосудов высокого давления. Одним из таких толщиномеров является прибор МТП-01; основные технические характеристики этого и других приборов приведены в табл. 11.2.

Прибор, благодаря автономному питанию и малой массе, используется в любых условиях (при монтаже оборудования, при его обследовании). Непосредственный отсчет показаний с цифрового индикатора позволяет оперативно оценить толщину защитного покрытия, как различных лакокрасочных материалов, так и любых электропроводящих ферромагнитных металлов (хром, медь, алюминий).

В качестве измерителей приращения магнитной индукции используются датчики Холла и магнитосопротивления.

11.2. Технические характеристики магнитных, магнитоиндукционных и вихретоковых толщиномеров МНПО "Спектр"

Характеристика	МТП-01	МТ-50НЦ	ВТ-60Н
Диапазон измерений, мкм	200 ... 10000	4 ... 1999	4 ... 1999
Погрешность измерения, мкм	5 %	$0,03a + 1^*$	5
Наименьший радиус кривизны детали, мм	40	40	5
Габариты, не более, мм	180 × 90 × 40	170 × 80 × 40	170 × 80 × 40
Масса, не более, кг	0,5	0,3	0,3

* a – толщина покрытия

Широкое применение находят *магнитоиндукционные толщиномеры*. Принцип действия таких толщиномеров основан на определении изменения магнитного сопротивления магнитной цепи, состоящей из ферромагнитной основы (контролируемый объект), преобразователя прибора и немагнитного зазора между ними, который является объектом измерений.

Как правило, первичный преобразователь содержит возбуждающую катушку, питаемую низкочастотным переменным током, и двух, расположенных по обе стороны от возбуждающих, измерительных катушек, включенных дифференциально. Все катушки размещены на ферромагнитном сердечнике.

Вдали от ферромагнитной детали ЭДС, наводимые на измерительные катушки, взаимно компенсируются. При приближении преобразователя к ферромагнитной основе его магнитная симметрия нарушается, и в измерительной обмотке наводится ЭДС, которая зависит от расстояния между контролируемой ферромагнитной поверхностью, обусловленной толщиной защитного слоя, и преобразователем.

Для увеличения точности измерений в таких толщиномерах электромагнитное поле локализовано с помощью удлиненного ферромагнитного стержня и шарикового наконечника. Это позволяет локализовать измерения в пятне контроля площадью до 1 мм^2 .

Примером такого магнитоиндукционного дефектоскопа может быть прибор МТ-50НЦ.

Приборы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности при измерении толщины, как лакокрасочных покрытий, так и покрытий из электропроводящих (неферромагнитных) материалов.

Вихретоковые толщиномеры основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля. Плотность вихревых токов в объекте зависит как от геометрических и электромагнитных па-

раметров объекта, так и от обусловленного измеряемой толщиной покрытия расстояния между преобразователем и поверхностью объекта контроля. Синусоидальный ток возбуждающей катушки создает электромагнитное поле, которое возбуждает вихревые токи в электропроводящем объекте, величина которых зависит от толщины неэлектропроводящего слоя.

Регистрируя напряжение на измерительных обмотках, расположенных по обе стороны от возбуждающей катушки и включенных дифференциально, получают информацию об измеряемой толщине.

Такие толщиномеры широко применяются для измерения толщины диэлектрических покрытий на электропроводящем основании таких, как оксидные, фосфатные, лакокрасочные, керамические, эмалевые, пластмассовые и другие. Для измерения диэлектрических покрытий ферро- и неферромагнитных металлов и сплавов можно использовать вихретоковый толщиномер ВТ-60НЦ.

Благодаря малой массе и автономному питанию прибор находит широкое применение в различных отраслях промышленности.

Измерение толщины радиационными методами. Выпускаемые радиационные измерители толщины покрытий можно разбить на три вида:

- 1) с прямой регистрацией обратно рассеянного β -излучения радионуклидов;
- 2) с непрерывным уровнем потоков обратно рассеянного β -излучения (компенсационный метод);
- 3) спектрометрический способ регистрации возбуждаемого флуоресцентного излучения.

Бесконтактное измерение толщины указанными выше измерителями за время порядка 10 с производится с погрешностью около 5 % в диапазоне толщин покрытий 0,25 ... 100 мкм.

Методы контроля покрытий разрушающими методами: контроля пластичности, внутренних напряжений, микротвердости, химсостава, функциональных свойств, испытания на пористость и прочность сцепления достаточно подробно описаны в [20].

ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ХИМИЧЕСКИХ, НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ТРУБОПРОВОДОВ

12.1. КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

12.1.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЙ ОДНОТИПНЫХ КОНТРОЛЬНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И РАЗМЕРНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Для проведения надежного и точного визуального и измерительного контроля специалист, непосредственно осуществляющий такой контроль, должен знать:

- 1) достоинства и недостатки сварных соединений;
- 2) процессы сварки и изготовления сварных изделий;
- 3) конструктивные особенности контролируемых сварных соединений и их использование;
- 4) терминологию сварки.

Достоинства сварных соединений:

1. Малая масса. По сравнению с литыми стальными конструкциями экономия по массе составляет до 30 %. Сваркой можно получить более совершенную конструкцию (литье не допускает больших перепадов размеров) с малыми припусками на механическую обработку. По сравнению с заклепочными соединениями экономия металла составляет 15 ... 20 %.

2. Стоимость сварной конструкции из проката примерно в 2 раза ниже стоимости литья и поковок. Это связано с малой трудоемкостью процесса, сравнительной простотой и дешевизной оборудования, так как не нужно одновременного плавления большого объема металла.

3. Равнопрочность сварного шва и соединяемых элементов. Плотность и герметичность соединения.

4. Возможность получения конструкций очень больших размеров.

Недостатки сварных соединений:

1. Возможность возникновения скрытых дефектов. Качество сварного соединения в значительной степени зависит от квалификации сварщика.

2. Трудность контроля качества сварного шва. Необходим тщательный визуальный и измерительный контроль. Существующие радиационные и ультразвуковые методы сложны.

3. Коробление деталей из-за неравномерности нагрева в процессе сварки.

4. Снижение прочности при переменных нагрузках. Сварной шов может концентрировать напряжение.

В требованиях НТД на энергетическое оборудование широко используются такие понятия как однотипные контрольные сварные соединения и размерные показатели.

Согласно, например [12], однотипными сварными соединениями является группа сварных соединений, имеющих следующие общие признаки:

а) способ сварки;

б) марка (сочетание марок) основного металла. В одну группу допускается объединять сварные соединения деталей из сталей различных марок, для сварки которых, согласно технологии, предусмотрено применение сварочных материалов одних и тех же марок (сочетаний марок);

в) марка (сочетание марок) сварочных материалов. В одну группу допускается объединять сварные соединения, выполненные с применением различных сварочных материалов, марки (сочетание марок) которых, согласно технологии, могут использоваться для сварки деталей из одной и той же стали; электроды должны иметь одинаковый вид покрытия по ГОСТ 9466-75 (в ред. 1991 г.) (основной, рутиловый, целлюлозный, кислый);

г) номинальная толщина свариваемых деталей в зоне сварки. В одну группу допускается объединять соединения с номинальной толщиной деталей в зоне сварки в пределах одного из следующих диапазонов:

- до 3 мм включительно;
- свыше 3 до 10 мм включительно;
- свыше 10 до 50 мм включительно;
- свыше 50;

- для угловых, тавровых и нахлесточных соединений указанные диапазоны относятся к привариваемым деталям; толщину основных деталей разрешается не учитывать;

д) радиус кривизны деталей в зоне сварки. В одну группу допускается объединять сварные соединения деталей с радиусом кривизны в зоне сварки (для труб - с половиной наружного номинального диаметра) в пределах из следующих диапазонов:

- до 12,5 мм включительно;
- свыше 12,5 до 50 мм включительно;
- свыше 50 до 250 мм включительно;
- свыше 250 (включая плоские детали).

- для угловых, тавровых и нахлесточных соединений указанные диапазоны относятся к привариваемым деталям; радиусы кривизны основных деталей разрешается не учитывать;

е) вид сварного соединения (стыковое, угловое, тавровое, нахлесточное). В одну группу могут быть объединены угловые, тавровые и нахлесточные соединения, кроме угловых сварных соединений приварки штуцеров (труб) к элементам котлов;

ж) форма подготовки кромок. В одну группу допускается объединять сварные соединения с одной из следующих форм подготовки кромок:

- с односторонней разделкой кромок и углом их скоса более 8° ;
- с односторонней разделкой кромок и углом их скоса до 8° включительно (узкая разделка);

- с односторонней разделкой кромок;

- без разделки кромок;

з) способ сварки корневого слоя: на остающейся подкладке (подкладном кольце), на расплавляемой подкладке, без подкладки (свободное формирование обратного валика), с подваркой корня шва;

и) термический режим сварки: с предварительным и сопутствующим подогревом, без подогрева, с послойным охлаждением;

к) режим термической обработки сварного соединения.

Контрольным сварным соединением является соединение, вырезанное из числа производственных сварных соединений или сваренное отдельно, но являющееся идентичным либо однотипным по отношению к производственным сварным соединениям и предназначенное для проведения разрушающего контроля при аттестации технологий сварки или проверки качества и свойств производственных сварных соединений.

12.1.2. НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И РУКОВОДЯЩИЕ ДОКУМЕНТЫ НА ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ

В России, требования к организации и порядку производства по визуальному и измерительному контролю оборудования энергетических объектов, устанавливает "Инструкция по визуальному и измерительному контролю" РД 03-606-03.

В соответствии с этим производственно-контрольным документом визуальный и измерительный контроль на стадии входного контроля основного материала (полуфабриката, заготовок, изделий) выполняется в соответствии с "Программой (планом, инструкцией) входного контроля", которая разрабатывается предприятием, выполняющим входной контроль. В этом документе должны указываться виды изделий, подлежащих контролю, виды и объемы контроля, способы кон-

троля, включая схемы выполнения замеров контролируемых параметров, нормативные показатели допустимых отклонений.

Визуальный и измерительный контроль качества изделий (деталей, сборочных единиц), а также сварных соединений при изготовлении (монтаже, ремонте, реконструкции) должен выполняться в соответствии с требованиями "Технологической карты контроля" или "Карт (схем) операционного контроля".

В указанных картах приводятся контролируемые параметры, последовательность контроля, объемы контроля и нормы оценки результатов контроля, средства контроля, схемы выполнения замеров контролируемых параметров.

Разработка карты выполняется предприятием, выполняющим работы, либо специализированной организацией.

Визуальный и измерительный контроль состояния металла и сварных соединений при техническом диагностировании оборудования и трубопроводов должен выполняться в соответствии с "Картами (схемами) визуального и измерительного контроля", которые разрабатываются в составе "Программы технического диагностирования".

Разработку "Программ технического диагностирования" производит предприятие, выполняющее работы по техническому диагностированию, или специализированная организация.

В картах должны указываться места проведения контроля на конкретном оборудовании, схемы контроля, средства измерения контролируемого параметра, нормы оценки качества, бланки фиксации измерений результатов контроля.

К производственно-контрольным документам США, широко используемым во многих странах и регламентирующим требования к выполнению визуального и измерительного контроля, относятся ASME-Code и кодекс американского общества сварочной техники AWS D1.1.

12.1.3. ПРОЦЕДУРА ВИЗУАЛЬНОГО И ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Порядок выполнения визуального и измерительного контроля сварных конструкций энергетических объектов при их изготовлении, ремонте и реконструкции на основе обобщения важнейших национальных норм можно записать в следующем виде.

При выполнении контроля до сварки специалист визуального контроля должен руководствоваться следующими правилами:

1. Проверить квалификационный статус производственно-технической документации на сварку.

2. Проверить квалификационный статус сварщика или оператора сварки, включая ограничения по типу основного и сварочных материалов, ограничения по толщине основного материала, положения сварки и действительность даты аттестации.

3. Проконтролировать соответствие освещения контролируемой поверхности нормам.

4. Проверить качество и соответствие основного материала и визуально проконтролировать подготовку и сборку деталей под сварку. Проконтролировать, соответствует ли изготавливаемый шов конструкторской документации, нет ли в месте, подготовленном для шва, дефектов.

5. Проконтролировать, выровнены ли между собой свариваемые детали, размеры притупления кромок, размеры угла разделки кромок, соответствуют ли друг другу части стыкового соединения, размеры зазоров, кольцевых прокладок и т.п.

6. Проверить, будут ли выполнены как общие, так и детальные условия сварочной технологии.

7. Проконтролировать, подготовлены ли прихватки к включению в основной шов или они удалены.

8. Если необходимо – проконтролировать внутреннюю часть сосудов или труб.

Во время сварки специалист визуального и измерительного контроля должен выполнить следующие процедуры:

1. Проконтролировать температуру предварительного подогрева.
2. Визуально проконтролировать чистоту (отсутствие сварочных брызг шлака, окислов и недопустимых дефектов) в каждом слое (валике) шва, кромок шва и прилегающих к ним поверхностей.
3. Проконтролировать значение сварочного тока и напряжения, если это предусмотрено технологией сварки.

После сварки специалист визуального и измерительного контроля должен выполнить следующие процедуры:

1. Проконтролировать температуру сварного соединения в соответствии с подробной технологией сварки.
2. Проконтролировать сварное соединение на соответствие требуемым размерам, включая длину сторон шва, катет, профиль углового шва и вогнутость шва, чешуйчатость шва, глубину западания между валиками, переход металла шва от толстой к тонкой секции, перелом осей

цилиндрических элементов и угловое смещение плоскостей плоских деталей.

3. Визуально проконтролировать поверхность сварного соединения на ее качество и наличие дефектов.

4. Проверить, удалены ли элементы, обеспечивающие подгонку свариваемых деталей, и другие временные элементы и приспособления.

12.1.4. НОРМЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ниже, на основе [12] приведены основные требования к нормам оценки качества сварных соединений, работающих под давлением и выполненных дуговой, электрошлаковой, электронно-лучевой и газовой сваркой, при визуальном и измерительном контроле.

В стыковых сварных соединениях элементов 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. 12.1.

12.1. Максимально допустимое смещение (несовпадение) кромок в стыковых соединениях, мм

Номинальная толщина стенки соединяемых элементов (деталей) 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 из 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

*Значения, приведенные в скобках, могут быть допущены только в случаях, указанных в рабочих чертежах

При визуальном и измерительном контроле сварных соединений не допускаются:

- трещины всех видов и направлений;
- непровары (несплавления) между основным металлом и швом, а также между валиками шва;
- непровары в корне шва (кроме случаев, оговоренных в НТД);
- наплывы (натеки) и брызги металла;

- незаваренные кратеры;
- свищи;
- прожоги;
- скопления;
- подрезы (кроме случаев, оговоренных в НТД);
- отклонения размеров шва сверх установленных норм.

Нормы допустимых дефектов, выявленных при визуальном и измерительном контроле, приведены в табл. 12.2.

12.2. 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	$0,12 \text{ РП}^{*1} + 0,6$, но не более 2	–
Одиночные включения	$0,12 \text{ РП} + 0,2$, 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 включ. 2,0 при D св. 25 до 150 включ. 2,5 при D свыше 150	–
Вогнутость корня шва при односторонней сварке труб без подкладных колец	$0,12 \text{ РП} + 0,4$, но не более 1,5	–

*¹ РП – размерный показатель; *² D – внутренний диаметр элемента, мм

12.1.5. КОНТРОЛЬ НАСОСОВ

Насос – это устройство для напорного перемещения главным образом жидкости в результате сообщения ей внешней энергии.

Контроль проводят в соответствии с "Картами (схемами) визуального и измерительного контроля", которые разрабатываются в составе "Программы технического диагностирования" и процедурой

демонтажа, описанной в инструкции изготовителя насосов.

Контроль конденсатных насосов и насосов питания бойлеров. При контроле необходимо проверить крыльчатки на наличие следов эрозионного износа поверхностей и повреждений от кавитации. Обычно указанные поверхностные дефекты находятся вблизи основания лопаток крыльчаток. Основание лопаток должно быть гладким и с плавными переходами. Лопатки, на которых виден повышенный износ, могут иметь зазубрины, а также пористость при наличии кавитации. Места, где имеются трещины, ремонтируются или крыльчатка заменяется. Входные элементы проверяются на эрозионный износ и трещины всех видов и направлений.

Размеры втулок и колец должны контролироваться в соответствии с допусками изготовителя. Повышенные зазоры уменьшают эффективность работы насоса и могут привести к гидравлической неустойчивости.

При отклонении от правильного взаимного расположения поверхностей вращающихся цилиндрических деталей насосов могут возникать радиальные и торцовые биения. Необходим контроль параметров биений.

Поверхности баббитовых элементов должны контролироваться на наличие изменений их формы, а также поверхностных дефектов. Баббит — очень мягкий материал и может задирается мельчайшими частицами при работе насосов. Корпус насоса должен контролироваться на коррозионный и эрозионный износ. Контур корпуса должны быть гладкими. Участки с местной коррозией или эрозией могут уменьшить эффективность работы и ускорить износ корпуса.

Все подшипники скольжения должны контролироваться с целью выявления изменений их формы, а также поверхностных дефектов (задилов, оспин). Конструктивные зазоры должны быть проверены щупом.

Контроль циркуляционных водяных насосов. После очистки элементов насоса они контролируются с целью выявления трещин, признаков наличия кавитационных и эрозионных износов.

Особого внимания требует контроль впускных и выпускных частей насосов.

Все эксплуатационные зазоры контролируются щупом.

Визуальный контроль клапанов. Клапан — это деталь или устройство для управления расходом газа, пара или жидкости в трубопроводах изменением площади проходного сечения.

Клапан состоит из корпуса, встроенного в трубопровод, и затвора, перемещающегося внутри корпуса и изменяющего проходное сечение, а, следовательно, и пропускную способность.

Клапаны, как и другая аппаратура, должны иметь четкую маркировку на корпусе, в которой должны быть указаны:

- а) наименование или товарный знак предприятия-изготовителя;
- б) условный проход;
- в) условное давление и температура среды;
- г) направление потока среды.

На маховике арматуры должно быть обозначено направление вращения при открывании и закрывании аппаратуры.

Клапаны в течение всего срока службы должны выдерживать динамические воздействия жидкости (газа), влияние температуры, перепады давления, вибрации, коррозионные и эрозионные воздействия.

Поскольку клапаны, как и любые устройства, редко обладают идеальными характеристиками, а их повреждения обходятся очень дорого, с точки зрения эксплуатации и безопасности, их необходимо периодически диагностировать.

До визуального и измерительного контроля любого клапана специалист должен ознакомиться с его устройством, назначением, температурным режимом, режимами под давлением и историей его эксплуатации.

При диагностировании лучше всего снять клапан с линии. Это позволит провести более надежную его диагностику, включая контроль внутренней поверхности.

Герметизирующие поверхности корпуса и затвора должны контролироваться на наличие физических повреждений: трещин, заеданий, зазубрин и т.п. Подгонка деталей клапана должна быть плотной, но не жесткой.

12.1.6. КОНТРОЛЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Визуальный контроль резьбовых соединений обычно проводят с целью выявления таких дефектов, как трещины всех видов и направлений, износа, физических повреждений на поверхности компонентов. Визуальный контроль, как правило, выполняется невооруженным глазом, если глаза могут находиться на расстоянии не более 60 см от контролируемой поверхности. При дистанционном визуальном контроле при использовании таких устройств, как телескопы и телекамеры, их пространственное разрешение должно быть по крайней мере эквивалентно пространственному разрешению, достижимому при непосредственном визуальном контроле.

Дефекты в элементах резьбовых соединений могут быть классифицированы на четыре группы:

1. Дефекты, возникающие при застывании металла в слитках. Длинные пустоты и металлические включения могут быть причиной возникновения других дефектов при эксплуатации резьбовых соединений.

2. Дефекты, происхождение которых связано с производством стержней и прутков.

3. Дефекты, возникающие при изготовлении шпилек, шайб, болтов и гаек при машинной обработке, термообработке, нанесении покрытий и других чистовых обработок. При изготовлении резьбовых деталей неизбежны погрешности профиля резьбы и ее размеров, возможны

неконцентричность диаметральных сечений и другие отклонения, которые могут нарушить свинчиваемость и ухудшить качество соединения. Здесь следует отметить, что снижение концентрации напряжений в резьбовом соединении достигается накатыванием, а не нарезанием резьбы, а также увеличением радиусов скругления во впадинах витков и под головкой болта; применением гаек, обеспечивающих выравнивание распределения осевой силы по виткам.

4. Дефекты, происхождение которых связано с эксплуатацией резьбового соединения. Дефекты часто возникают в области перехода между головкой и телом детали, в первой нитке резьбы гайки и на переходе от резьбы к телу детали.

Измерительный контроль резьбовых деталей осуществляют калибрами или измерительными средствами, имеющими наконечники, подобные калибрам по форме. Проекционный контроль осуществляют на проекторах различных типов. Резьбовой профиль контролируемой детали проецируется на экран и сравнивается с одним образцовым или с двумя предельными профилями.

12.1.7. КОНТРОЛЬ ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА ПАРОВЫХ ТУРБИН НА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Тщательный внешний осмотр лопаток является одним из важнейших элементов контроля их состояния.

Лопатки всех ступеней турбины должны осматриваться дважды — до и после их очистки. При выборе способа очистки важно, чтобы в результате чистки на лопатках не оставалось глубоких рисок, являющихся концентраторами местных напряжений. Это относится как к очистке от солей, так и к подготовке поверхности лопаток для дефектоскопии (ультразвуковой, цветной и травлением). Осматривать лопатки необходимо с помощью лупы, зеркальца или трехгранной призмы при хорошем местном освещении.

При осмотре необходимо отметить общее состояние лопаточного аппарата и те изменения, которые произошли по сравнению с состоянием во время предыдущего ремонта: механические повреждения, забоины, надрывы, срыв или ослабление крепления стеллитовых пластин, крупные риски и т.п.; определить наличие и характер задеваний лопаток в радиальном и аксиальном направлениях, выявить возможные причины этих задеваний, измерить зазоры в проточной части и осевой разбег ротора, сопоставить эти данные с заводскими и с данными предыдущего ремонта; выявить степень и характер заноса солями; оценить эрозионный и коррозионный износ лопаток, обратив особое внимание на эрозионный износ выходных кромок лопаток.

При осмотре лопаток следует проверить:

- профильную часть лопаток, входные и выходные кромки по всей длине лопатки, головки шипов (легким простукиванием), бандажные проволоки, хвостовики лопаток (при верховой посадке — в местах между заклепками, а также в местах перехода от хвостовой части к профильной; при посадке в паз — в местах выхода из паза и перехода к профильной части);

- бандажную ленту у головок шипов лопаток (появление и развитие трещин обычно происходит с угла прямоугольного отверстия в ленточном бандаже);

- места пайки бандажной проволоки, где могут возникнуть обрывы по всему сечению проволоки или отставание припоя (обрывы и отпайки проволочного бандажа обнаруживаются нажимом на лопатку с помощью медного ломика);

- отсутствие обрывов непаяных (демпферных) проволок, нет ли относительного смещения проволок; осмотреть участки проволок вблизи отверстий; следы натертости на проволоке и увеличение или уменьшение, по сравнению с чертежными; размеры свисающих концов указывают на смещение проволок в процессе

эксплуатации; в этом случае особо внимательно осмотреть лопатки у отверстий под проволоку, где возможно появление микротрещин;

- температурные зазоры между ленточными бандажами;

- стыки стеллитовых пластин и защитный слой против эрозии, нанесенный электроискровым способом, где возможно появление микротрещин;

- состояние осевых и радиальных уплотнений на лопатках и бандажной ленте.

При перелопачивании особое внимание обратить на:

- качество выполнения галтелей в местах перехода от профильной к хвостовой части лопаток и у шипов, наличие фасок в отверстиях под бандажную проволоку и в местах, где возможны местные концентрации напряжений;

- чистоту поверхности профильной части лопаток, прочность крепления стеллитовых пластинок и качество защитного слоя электроискрового уплотнения;

- правильность установки лопаток в радиальном и аксиальном направлениях и равномерность шага между лопатками (в соответствии с данными чертежа);

- плотность прилегания соприкасающихся между собой плоскостей хвостовиков лопаток и посадку лопаток в пазах или на гребнях диска (щуп 0,03 мм не должен проходить в местах сопряжений).

В случае единичных обрывов или отпаяк проволочных бандажей от лопаток повреждение устраняется путем зачистки и последующей запайки серебряным припоем.

При обрыве единичного шипа проводят приварку или припайку бандажной ленты в месте обрыва, а, если возможно, заменяют лопатку.

При стирании шипов из-за задевания допустима обварка их аустенитным электродом по специальной инструкции завода; при большом числе обрывов шипов требуется перелопачивание и настройка лопаток ступени.

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 от отверстия), угол между направлением трещины и радиальной осью лопатки.

Обнаруженная трещина в одной из лопаток может послужить своего рода указателем, где в первую очередь можно обнаружить дефекты на других лопатках.

При обнаружении излома хвостовика лопатки в пазу диска, как правило, необходимо произвести разлопачивание и осмотр хвостовиков 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.

В некоторых случаях 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.

Все данные о характере повреждения лопаток, взаимное их расположение на диске наряду с другими факторами и вибрационными испытаниями помогут определить причины повреждения, опасность той или иной формы колебаний, а следовательно, и возможные методы вибрационной настройки.

Для последних ступеней турбины необходимо зафиксировать величину и характер эрозионного износа лопаток.

Эрозии особенно подвержены рабочие лопатки вдоль входных кромок в верхней части и вблизи бандажной проволоки, а в некоторых случаях и выходные кромки вблизи корневого сечения.

Эрозионный износ входных кромок фиксируется на эскизе лопатки или очерчиванием кромки изношенной лопатки на миллиметровой или на плотной бумаге. Бумага с предварительно сделанными вырезами в местах нахождения скрепляющих проволок прикладывается к лопатке с вогнутой стороны. Измерения должны производиться каждый раз на одних и тех же лопатках (на четырех-пяти лопатках ступени).

За базу отсчета величины эрозионного износа следует принять неизношенный участок входной кромки с привязкой к основным размерам лопатки (например, к месту установки ближайшего проволочного бандажа или к корневому сечению). Наиболее изношенные лопатки рекомендуется сфотографировать.

Эрозированной поверхность входных кромок не рекомендуется срезать. При наличии специальных устройств можно выполнить наплавку металла, но для этого требуется разлопачивание ступени. Эрозию выходных кромок наоборот, следует локализовать во избежание образования и развития трещин, могущих возникнуть вследствие появления концентратора напряжений.

Поэтому особо тщательное наблюдение следует вести за эрозией выходных кромок лопаток последних ступеней мощных турбин. Осмотр этих лопаток должен проводиться не только во время капитальных, но и при текущих ремонтах (при закрытых цилиндрах – со стороны конденсаторов). На лопатках, имеющих износ выходных кромок, необходимо выполнить работы по восстановлению кромок путем подрезки до получения ее толщины не менее 1,2 ... 2,0 мм с последующим округлением и тщательной шлифовкой до $Ra = 0,63 \dots 1,25$ мкм.

12.2. КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ОБЪЕКТОВ

В достаточно общем виде 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° и не выше 525°C , устанавливает ГОСТ Р 50599–93.

Этот нормативный документ, в зависимости от исполнения цилиндрической части корпуса сосудов и аппаратов, классифицирует их на следующие типы:

1. *Кованые*, изготовленные из одной кованой обечайки.

2. *Кованосварные*, изготовленные из однослойных кованых обечаек, сваренных кольцевыми швами между собой и концевыми элементами (днищами, фланцами, горловинами).

3. *Многослойные рулонированные*, изготовленные из нескольких рулонированных обечаек, сваренных между собой кольцевыми швами, а также в совокупности с однослойными частями (трубными досками, обечайками, патрубками и т.п.) и концевыми элементами.

4. *Вальцованосварные*, обечайки которых изготовлены методами вальцовки из толстолистовой стали с последующей

сваркой продольными швами, а затем соединены кольцевыми сварными швами между собой и концевыми элементами.

5. *Штампованные*, обечайки которых изготовлены из толстолистовой стали методом штамповки полуобечаек с последующей сваркой их продольными швами между собой и концевыми элементами.

Объектами контроля сосудов и аппаратов являются материалы, элементы корпуса, сварные соединения.

К материалам, из которых изготавливают сосуды и аппараты, относится листовая сталь, в том числе двухслойная, сортовой прокат, кованые и штампованные заготовки.

К элементам корпуса сосуда и аппарата относятся фланцы, крышки, обечайки, днища, штуцера (патрубки), горловины.

Различным способам исполнения сосудов и аппаратов соответствуют следующие типы сварных соединений:

1) стыковые и угловые, соединяющие монолитные однослойные элементы;

2) стыковые и угловые, соединяющие многослойные элементы;

3) стыковые и угловые, соединяющие однослойные элементы с многослойными.

По расположению в сосуде или аппарате сварных соединений, они подразделяются на следующие категории:

– *A* – продольные сварные соединения в обечайках, в сферических и эллиптических днищах и их заготовках;

– *B* – кольцевые сварные соединения в обечайках, кольцевые сварные швы, соединяющие кованые, штампованные, многослойные (рулонированные) обечайки между собой и с днищами, фланцами, горловинами;

– *C* – сварные швы, соединяющие фланцы, трубные доски с обечайками, а также фланцы с патрубками;

– *D* – сварные соединения вварки (приварки) штуцеров (патрубков), горловин в обечайки, днища;

– *E* – сварные соединения приварных элементов к корпусу;

– T – соединения приварки труб к трубной решетке.

При изготовлении сосудов и аппаратов обязательному визуальному осмотру должны подвергаться такие объекты, как листовая и двухслойная сталь, кованные и штампованные заготовки, элементы сосудов, сортовой прокат, сварные соединения, при этом сварные соединения категорий A , B , C и D должны подвергаться контролю в объеме 100 % длины контролируемых швов.

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.

При гидравлических испытаниях предусматривается повторный визуальный осмотр сварных швов корпусов сосудов и аппаратов с наружной и внутренней поверхности, а также визуальный контроль ремонтных мест.

Основные технические требования к визуальному осмотру приведены в табл. 12.3.

Обязательные требования к организации и порядку производства работ по визуальному и измерительному контролю приведены в инструкции РД 03-606-03.

При оценке качества изделий по результатам визуального контроля в отрасли химического машиностроения не допускаются следующие дефекты:

- трещины всех видов и направлений;
- поры, свищи;
- подрезы, непровары, несплавления;
- наплывы, прожоги, незаплавленные кратеры.

12.3. Требования к визуальному осмотру

Объект контроля	Объем контроля	Увеличение при осмотре в сомнительных местах	Применение метода в составе технологического процесса
Кованные, штампованные детали	100 % поверхности		После механической обработки
Кромки под сварку	100 % поверхности, включая прилегающую зону шириной не менее 30 мм	10-кратное	После термической обработки Перед сваркой
Наплавки	100 % поверхности		
Сварные соединения	Внутренняя и наружная поверхности сварного соединения с прилегающей околосшовной зоной шириной не менее 30 мм	3 ... 4-кратное	До и после гидравлических испытаний

12.3. КОНТРОЛЬ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводы – одно из ответственных и металлоемких сооружений любого промышленного объекта.

В зависимости от назначения и расположения трубопроводы в основном подразделяются на промысловые, магистральные, технологические и продуктопроводы.

Промысловые трубопроводы сооружают на нефтяных или газовых промыслах, и они служат для подачи добываемого продукта от скважин до установок комплексной подготовки газа и нефти к транспортировке по магистральным трубопроводам.

Магистральные трубопроводы предназначены для транспортировки продукта (газ, нефть, вода) от места его добычи к месту переработки и потребления. Отличительная особенность магистральных трубопроводов – большая протяженность и постоянный (за исключением коротких переходных участков) по всей длине диаметр, обычно превышающий 500 мм.

Технологические трубопроводы предназначены для транспортировки в пределах промышленного предприятия или группы этих предприятий различных веществ (сырья, полуфабрикатов, реагентов, пара, воды, газа, промежуточных и конечных продуктов и др.), необходимых для ведения технологического процесса или эксплуатации оборудования.

Продуктопроводы отличаются от магистральных трубопроводов тем, что по ним перекачивают не сырье, а продукты химической переработки нефти и газа (этан, этилен, пропилен, аммиак, бензин и т.п.). Их диаметр не превышает 425 мм.

К основным элементам любого трубопровода независимо от назначения относят:

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, гнутый компенсатор, а также изделия, входящие в конструкцию трубопровода: крепежные детали, опоры, подвески, прокладки и т.п.

Элемент – две или более сваренные между собой детали.

Узел – часть линии трубопровода (сборочная единица), ограниченная транспортными габаритами, которая по размерам и конфигурации может быть установлена в проектное положение или подлежит последующей укрупнительной сборке в блоки. Узел трубопровода состоит из одного или нескольких элементов и арматуры. Узлы подразделяются на плоские и пространственные.

Блок – линия или часть линии трубопровода, состоящая из одного или нескольких узлов, арматуры и отрезков труб, собранных из разъемных и неразъемных соединений, которая по размерам и конфигурации может быть установлена в проектное положение без предварительного укрупнения.

Секция – часть линии трубопровода (сборочная единица), состоящая из нескольких сваренных между собой труб одного диаметра, ось которых составляет одну прямую линию и общая длина не превышает транспортных габаритов.

Плеть – линия или часть линии трубопровода, состоящая из нескольких сваренных между собой секций трубопроводов. Плетти обычно собирают и сваривают на месте прокладки трубопровода.

При изготовлении и монтаже трубопроводов применяют большое число фасонных частей и деталей (рис. 12.1).

Отводы предназначены для изменения направления потока транспортируемого продукта. По конструкции и способу изготовления отводы могут быть крутоизогнутые или гнутые, бесшовные, штампосварные и сварные (секционные).

Переходы предназначены для изменения диаметра трубопровода. По конструкции переходы подразделяются на кон-

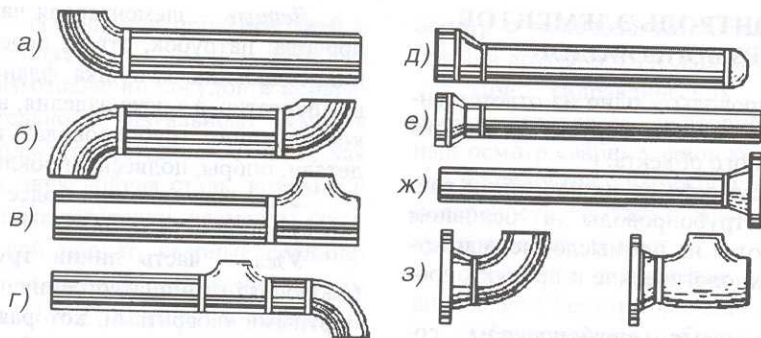


Рис. 12.1. Элементы трубопроводов:

а – труба и отвод; *б* – отвод, труба и отвод; *в* – труба и тройник; *г* – труба, тройник, труба и отвод; *д* – эксцентрический переход, труба и заглушка; *е* – концентрический переход и труба; *ж* – труба и фланец; *з* – фланец и отвод, фланец и тройник

центрические, применяемые для линий трубопроводов, расположенных вертикально, и эксцентрические – для расположенных горизонтально.

Тройники предназначены для устройства ответвлений трубопроводов при разделении потока транспортируемого продукта. По конструкции тройники подразделяются на равнопроходные, без уменьшения диаметра ответвления, и переходные с его уменьшением.

Заглушки предназначены для закрытия свободных концов трубопроводов. По конструкции заглушки подразделяются на эллиптические, плоские и плоские ребристые.

Фланцы – наиболее распространенный тип съемного соединения трубопроводов. Тип фланцев и конструкции уплотнительных поверхностей применяют в зависимости от рабочих параметров и физико-химических свойств транспортируемого продукта. По конструкции фланцы могут быть: плоские приварные, приварные встык или воротниковые и свободные, выполняемые на приварном кольце или на отбортованной трубе.

Основными способами сварки, наиболее широко применяемыми при монтаже трубопроводов, являются: газовая; ручная дуговая покрытыми металлическими электродами; дуговая неплавящи-

мися и плавящимися электродами в защитных газах; порошковой проволокой под флюсом и электроконтактная сварка. Схема типового технологического процесса сварки трубопроводов приведена на рис. 12.2.

При входном контроле труб, предназначенных для сооружения промышленных 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, задигов и других механических повреждений, металлургических 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;

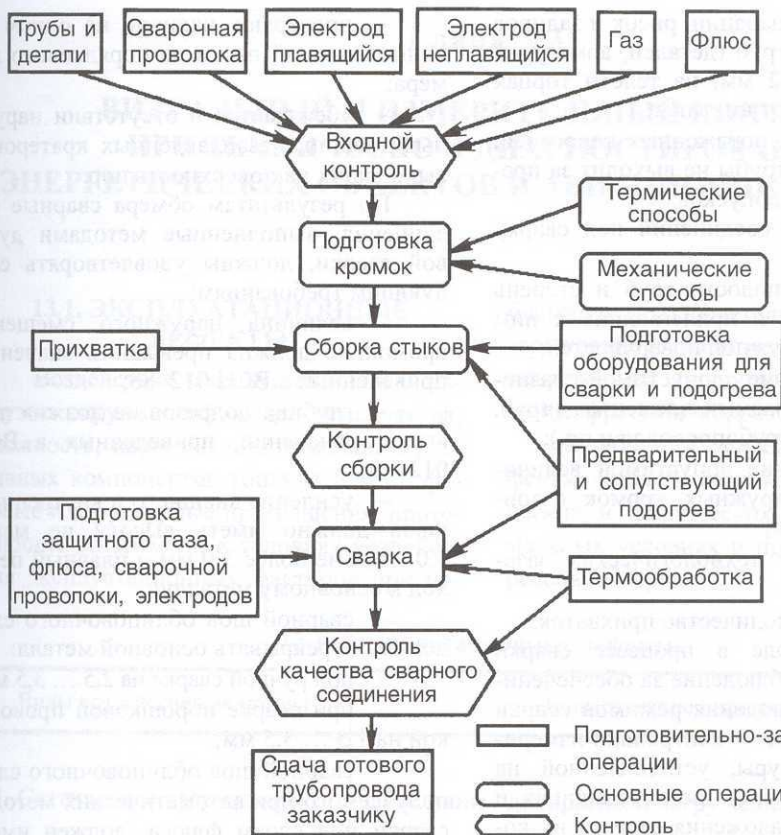


Рис. 12.2. Схема типового технологического процесса сварки трубопроводов

– размеры обнаруженных забоин, ризок, вмятин на теле и на торцах.

Трубы считаются пригодными при условии, что:

– они соответствуют требованиям технических условий и стандартов на поставку и имеют заводскую маркировку и сертификаты;

– отклонения наружного диаметра корпуса трубы по длине не менее 200 мм от торца не превышают для труб диаметром до 800 мм включительно предельных величин, регламентированных соответствующими ГОСТами и ТУ, а для труб диаметром свыше 800 мм – ± 2 мм;

– отклонения толщины стенки по торцам не превышают предельных значений, регламентированных соответствующими ГОСТами и ТУ;

– овальность бесшовных труб не выводит их наружный диаметр за предельные отклонения, а сварных труб, диаметром 426 мм и более, 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 задиrow 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 контроле в процессе сварки осуществляют наблюдение за обеспечением строгого соблюдения режимов сварки (по показаниям контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на сварочных агрегатах, постах, машинах и т.п.), порядком наложения слоев и их количеством, применяемыми материалами для сварки корневого и заполняющих слоев, временем перерывов между сваркой корневого шва и "горячим проходом" и других требований технологических карт.

Все сварные соединения труб: с деталями трубопроводов, арматурой и т.д., после их очистки от шлака, грязи, брызг металла, снятия грата подвергают визуальному контролю и обмеру.

Визуальный контроль и обмер проводят работники службы контроля (ПИЛ, специализированных управлений по контролю и т.п.).

При осмотре сварного соединения:

– проверяют наличие на каждом стыке клейма сварщика, выполнявшего 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 требованиям:

– 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.

При нанесении покрытий на трубы на месте укладки трубопроводов следует осуществить специальный контроль с тем, чтобы определить, что машина для очистки труб и нанесения на них покрытия не вызвала образования дефектов на трубопроводе. Покрытия следует контролировать непосредственно перед укладкой трубопровода, во время и после его укладки для выявления дефектов в покрытиях. Плешины и другие повреждения на покрытиях нужно отремонтировать и вновь проконтролировать.

Глава 13

ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

13.1. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ

Воздействие эксплуатационных нагрузок, окружающей среды (температура, влажность, пары кислот, щелочей, агрессивных компонентов топлива и т.д.), фазовые и структурные превращения, протекающие во времени в условиях воздействия эксплуатационных факторов при не-

благоприятных сочетаниях могут вызвать зарождение и развитие эксплуатационных повреждений (коррозионные язвы, питтинги, фреттинг-коррозия, трещины).

В табл. 13.1 приведены основные дефекты деталей, возникающие при статических и циклических нагрузках в нормальных условиях и при воздействии агрессивных сред.

13.1. Эксплуатационные дефекты

Виды воздействия на металл	Наименование дефектов
1. Статическое нагружение	Трещины однократного нагружения (хрупкие, вязкие) Трещины замедленного разрушения Трещины ползучести Коррозионное поражение металлов Коррозионное растрескивание Водородная хрупкость
2. Динамическое нагружение	Износ Трещины механической усталости Трещины термической усталости Трещины коррозионной усталости Выкрашивание и трещины контактной усталости
3. Термические напряжения	Дефекты при воздействии термических напряжений
4. Радиационные повреждения	Охрупчивание

13.1.1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Трещина однократного нагружения, как правило, образуется в материале деталей при воздействии на них нагрузок, превышающих прочность деталей. Трещина называется *трещиной вязкого разрушения*, если предшествующая образованию трещины деформация происходила в объеме, соизмеримом с объемом детали. Если в зоне образования трещины отсутствуют видимые следы макропластической деформации, трещина называется *хрупкой*.

Вязкие трещины имеют, как правило, внутризеренный характер распространения. Вязкая трещина ориентирована либо нормально к направлению действия растягивающих напряжений, либо совпадает 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.

Трещины замедленного разрушения. Замедленным (задержанным) разрушением принято называть хрупкое разрушение, наступающее с течением времени под воздействием статической нагрузки при напряжениях, меньших предела прочности (иногда ниже предела текучести) материала без влияния повышенной температуры и коррозионных активных сред.

К факторам, повышающим склонность материалов к замедленному разрушению, относят наличие в них водорода; в закаленных сталях — закономерности мартенситного превращения, приводящего к возникновению в структуре стали остаточных микронапряжений; постепенное накопление дефектов структуры при

вязком течении по границам зерен. Возникновению трещин замедленного разрушения способствует наличие на поверхности детали хрупкого слоя, монтажные перекосы. 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 замедленно разрушаются, как правило, по границам зерен; стали — часто по телу зерен или границам субзерен.

Характер разрушения в значительной степени определяется и уровнем действующих напряжений. Так, в алюминиевых сплавах при относительно низком уровне напряжений, излом в зоне замедленного разрушения практически полностью межзеренный, при повышенных напряжениях — смешанный.

Трещины ползучести. Разрушение деталей после пластического течения их материала под воздействием постоянного напряжения при относительно высоких температурах называется *разрушением от ползучести*. Для ползучести является характерным множественное трещинообразование.

При температуре примерно выше половины абсолютной температуры плавления материала характер разрушения изменяется. Материалы, которые ранее деформировались по типу вязкого транскристаллического сдвига, теперь могут разрушаться в результате разделения по границам зерен. Ниже указанной температуры области "граница зерен" служит эффективным барьером для движущихся дислокаций, но с началом возвратных процессов она способствует разрушению. Таким образом, типичным для длительного высокотемпературного нагружения является межзеренное разрушение. Одна-

ко не исключено и внутризеренное разрушение, возможность которого определяется скоростью деформирования и температурой. С повышением температуры переход от внутризеренного разрушения к межзеренному смещается в область более высоких скоростей деформирования.

Большое влияние на характер разрушения оказывают размер зерен и их разнородность. Для материала с разнородным зерном характерно межзеренное разрушение и внутризеренное – по более крупным.

Как при статическом, так и при переменном нагружении металла особую опасность вызывает такой дефект, как коррозионное поражение.

13.1.2. КОРРОЗИЯ МЕТАЛЛОВ

Коррозия металлов – это физико-химическое взаимодействие металлического материала и среды, приводящее к ухудшению эксплуатационных свойств материала, среды или технической системы.

В результате коррозии ежегодно теряется более 1 % всего металла, накопленного и эксплуатируемого человечеством. Еще большие косвенные потери происходят по причине аварий и связанных с ними простоев и снижения производительности оборудования, обусловленного снижением прочности металлических конструкций, подвергшихся коррозии. 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 более 4 % национального дохода.

Коррозионные процессы классифицируют:

- 1) по механизму реакции взаимодействия металла со средой;
- 2) по типу коррозионной среды;
- 3) по виду коррозионных разрушений на поверхности или в объеме металла;
- 4) по 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.

Еще более многообразны виды коррозии металлов в технических средах: различают коррозию в контактных (соприкосновение в электролите двух разнородных металлов, образующих замкнутый гальванический элемент), щелевую (в узких зазорах между деталями, куда может проникать электролит), щелочах, органических средах, расплавах солей и т.п.

Коррозия, захватившая всю поверхность металла, называется *сплошной*. Ее 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 незатронутую значительную (иногда подавляющую) часть поверхности (рис. 13.1). В реальных условиях опасность локальных коррозионных разрушений чаще всего выше опасности равномерной коррозии.

Причины локальной коррозии металлов разнообразны: различия в составе зерна металла в объеме и на границе, концентрация механических напряжений, микровключения, разная природа контактирующих металлов, диффузионная нерав-

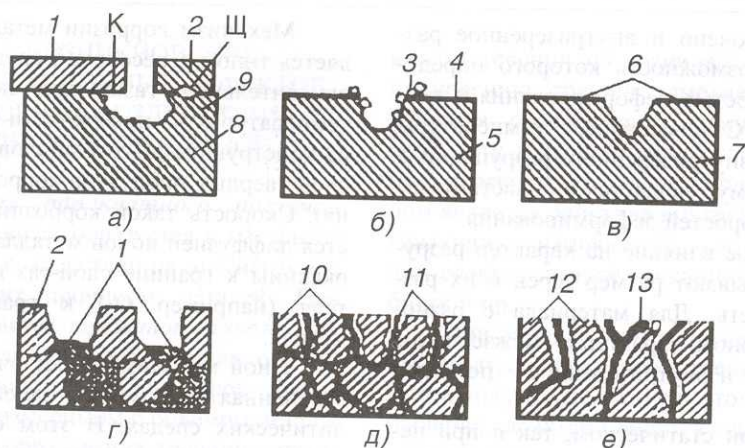


Рис. 13.1. Различные виды локального коррозионного воздействия вследствие образования микрогальваноземментов (схема):

а – контактная (К) и щелевая (Щ); б – "обесцинкование", "обезникеливание", "обезалюминиевание"; 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

нодоступность 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 *поверхностной 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 коррозия*, развивающуюся, например, под неметаллическими покрытиями, и *послойную коррозия*, идущую преимущественно в направлении пластической деформации. Специфична *избирательная коррозия*, при которой в сплаве могут избирательно растворяться отдельные компоненты твердых растворов (например, обесцинкование латуней).

Особую группу образуют коррозионно-механические разрушения, в которую входят: коррозионное растрескивание, коррозионная усталость, фреттинг-

коррозия, водородное охрупчивание, эрозия, водородная коррозия, кавитационная коррозия. Скорость коррозии характеризуется качественными и количественными показателями. К первым относят: изменение внешнего вида поверхности металла; изменение его микроструктуры и др. Количественными показателями служат: время до появления первого коррозионного очага, число коррозионных очагов за определенный промежуток времени; уменьшение толщины металла, отнесенное к единице времени и т.п.

Коррозионному воздействию особенно подвержены холоднодеформированные области изделий, поэтому необходимо вернуть холоднодеформированный материал в исходное состояние с помощью термообработки, например, отпуска для снятия напряжений, не упуская из виду возможности протекания рекристаллизации.

Питтинги возникают главным образом в защитном слое (нанесенном или образовавшемся естественным образом) по местам различных дефектов (трещин от внутренних напряжений, пор, микровключений, выхода на поверхность границ зерен, дислокаций и т.п.). В зависимости от продолжительности питтинговой коррозии и других факторов глубина и поперечник питтинга могут изменяться от мкм до см. Питтинги 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.

Стандарты некоторых стран (например, канадский стандарт CAN3 – Z183 – M86 на системы нефтепроводов) допускают местную питтинговую коррозию даже до глубины 80 % номинальной толщины стенки трубы при условии, что продольная длина корродированного участка (рис. 13.2) не превышает значения, полученного с помощью уравнения

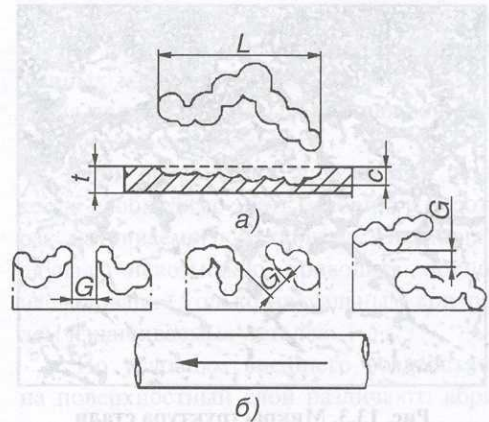


Рис. 13.2. Схема линейной питтинговой коррозии:

а — изолированный участок;
б — взаимодействующие участки

$$L = 1,12B\sqrt{Dt},$$

где L — максимально допустимая продольная длина коррозионного участка, мм;

$$B = \sqrt{\frac{c/t}{1,1c/t - 0,15}} - 1,$$

D — номинальный наружный диаметр трубы, мм; t — номинальная толщина стенки трубы, мм; c — максимальная глубина коррозионного участка, мм.

Считается, что близко расположенные корродированные участки взаимодействуют, если расстояние G между ними меньше продольной длины наименьшего участка, подвергнутого коррозии. Продольная длина во всех случаях измеряется по продольной оси трубы.

Межкристаллитная коррозия — это преимущественное разрушение металла вдоль границ зерен (рис. 13.3). 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 многие сплавы на основе Fe (в т.ч. ферритные, аустенит-

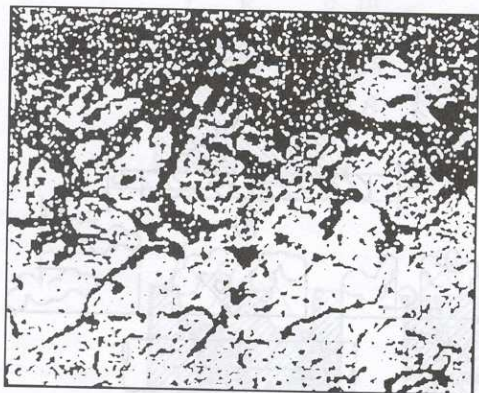


Рис. 13.3. Микроструктура стали с межкристаллитным поражением

ные, аустенитно-ферритные и другие стали), Ni, Al 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 обедненные этим компонентом (обедненные зоны). Под действием той или иной агрессивной среды происходит избирательное анодное растворение либо самих избыточных фаз, либо соседних с ними обедненных зон.

Анализ случаев выхода из строя нефтехимического оборудования по причине межкристаллитной коррозии показал, что разрушение обычно происходит в сварных швах и по зоне термовлияния; иногда корродирует основной металл. Чаще всего межкристаллитные трещины начинают развиваться от непроваров и других дефектов сварки.

Стойкость материала против межкристаллитной коррозии повышают выбором режима термообработки, снижением содержания примесей, легированием элементами, предотвращающими образование нежелательных фаз по границам зерен.

Коррозионное растрескивание происходит при одновременном воздействии статических растягивающих напряжений (внешних и внутренних) и коррозионной среды. Подобно хрупкому разрушению, происходит практически без пластической деформации макрообъемов металла. Непременным условием такой коррозии является локализация процесса на наиболее напряженных местах поверхности. Это могут быть трещины в защитных покрытиях, границы зерен, выходы дислокации. В зависимости от особенностей структуры металла и состава коррозионной среды коррозионное разветвление может быть меж- или транскристаллитным. В общем процессе развития коррозионной трещины (сильно разветвленной) различают инкубационный период (до появления зародышевой трещины), периоды развития трещины и хрупкого разрушения.

Следует различать коррозионное растрескивание под напряжением, требующее растягивающего напряжения, и межкристаллитную коррозию, которая происходит 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 возникает в местах контакта плотно сжатых или катящихся одна по другой деталей, если в результате вибраций между их поверхностями возникают микроскопические смещения сдвига.

Разрушение под влиянием водорода (водородная хрупкость). Под влиянием растворенного водорода металлы могут настолько охрупчиваться, что уже при приложении малого растягивающего напряжения образуются трещины. Источниками поступления водорода могут являться термическая диссоциация воды при металлургических процессах (литье, сварка), 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 также поры и неметаллические включения. Водород может диссоциировать в результате хемосорбции на железе и служить источником его хрупкости.

Разрушение, вызванное воздействием водорода, происходит интенсивнее под действием внешней медленно возрастающей или постоянной статической нагрузки (медленное разрушение); при наличии остаточных напряжений (усадочные напряжения и напряжения, связанные с превращениями); холодной деформации; увеличении прочности в результате закалки; низких температурах (но выше -70°C).

По отношению к исходному аустенитному зерну вызванное воздействием водорода разрушение стали может быть как межзерненным, так и внутривитерненным.

13.1.3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Износ может быть определен как изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия вследствие разрушения микрообъемов поверхностного слоя изделия за счет механического воздействия.

Контактирующие поверхности изнашиваются в любой машине. Во многих случаях вред может быть минимизирован смазкой, фильтрацией масла, выбором материалов и соответствующей конструкцией и другими методами.

Во многих отношениях износ подобен коррозии. Оба эти явления: многообразны и обычно случаются одновременно; предсказуемы при постоянных окружающих условиях; чрезвычайно трудно оцениваемые ускоренными методами в усло-

виях эксплуатации и трудно классифицируемые из-за небольших изменений размеров, формы и массы деталей, подверженных износу. Наконец, и износ и коррозия являются чрезвычайно важной экономической проблемой.

При выполнении визуального контроля необходимо знать историю и работу рассматриваемого механизма. Во многих случаях невозможно проводить полное исследование только визуальным контролем изнашиваемых деталей.

По условиям внешнего воздействия на поверхностный слой различают: абразивный, эрозионный, адгезионный и другие виды износа.

Абразивный износ характеризуется срезом. Он происходит, когда одна поверхность трется под давлением по другой поверхности с достаточно большим выделением тепла. Абразивный износ — это непреднамеренная механическая обработка.

Эрозионный износ происходит тогда, когда частицы в жидкости или другой среде скользят или перекатываются с большой скоростью. Каждая из движущихся частиц очень незначительна по размерам и массе, но их достаточно большое количество приводит к износу в таких механических сборках, как насосы, крыльчатки, паропроводы, сопла, трубопроводы с резкими изгибами. Эрозионный износ может изменить форму лопастей крыльчаток, лопаток турбин так, что ухудшается эффективность их работы.

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 выделения тепла. При таком взаимодействии выступ на одной стороне становится выше, а на другой — ниже первоначальной высоты. Кончик выступа может либо обломаться при новом контакте, либо снова свариться с выступом противоположной поверхно-

сти и цикл повторяется. В результате такого износа в стали возникает структура (белый неотпущенный мартенсит), очень чувствительная к растрескиванию из-за ее хрупкости.

Межгосударственным советом по стандартизации, сертификации и метрологии в июне 1997 г. принят межгосударственный стандарт ГОСТ 30479-97 "Обеспечение износостойкости изделий. Методы установления предельного износа, обеспечивающего требуемый уровень безопасности. Общие требования".

Стандарт устанавливает требования к методам определения предельного износа и предельных величин зазоров в сопряжениях, при которых обеспечивается безопасность эксплуатации изделий и их составных частей, работающих в условиях трения и износа.

При определении предельного износа следует учитывать, что линейный закон изменения износа может привести к нелинейным временным зависимостям параметра безопасности, например, износ может обуславливать скачкообразный характер изменения состояния устройства (при определенном износе накладок тормоза грузоподъемной машины происходит скачкообразное изменение в кинематических взаимодействиях).

По критерию интенсивного возрастания износа предельный износ должен быть установлен в момент резкого возрастания износа (рис. 13.4).

Процесс постепенного накопления повреждений и разрушение металлов под действием многократно приложенных нагрузок носит название *усталость*.

Свойство металла сопротивляться усталости носит название *выносливость*.

Чтобы подчеркнуть сложность и важность проблем, связанных с усталостью, достаточно указать, что она ответственна примерно за 50 % случаев всех аварийных разрушений, встречающихся в инженерной практике.

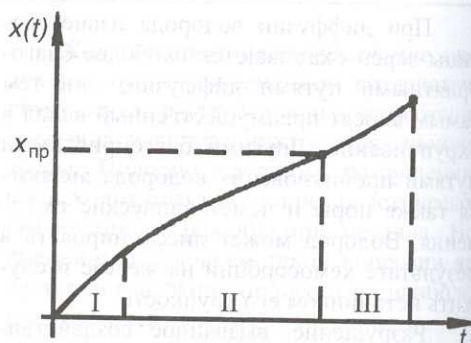


Рис. 13.4. Характер процесса изнашивания:
I – период приработки;
II – период нормального рабочего износа;
III – период интенсивного изнашивания

И действительно, большинство разрушений происходит от усталости и сравнительно меньше – от статических нагрузок.

Скольжение – это перемещение части плоскостей внутри кристаллической решетки (рис. 13.5, в, з).

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 отражение того, что имеется на другой стороне (рис. 13.5, д).

Микроструктурные теории усталостного разрушения основываются на представлении о сдвигах, происходящих в полосах скольжения и приводящих к образованию интрузий и экструзий.

В полосах скольжения на поверхности деталей, подвергнутых знакопеременной нагрузке, можно наблюдать с помощью электронных микроскопов выдавливание тонких лепестков металла, названных экструзиями (рис. 13.6, б).

Вдавливание или углубление этих полос, проиллюстрированное на рис. 13.7, принято называть интрузией. С этими понятиями многие исследователи связывают механизм усталости металлов.

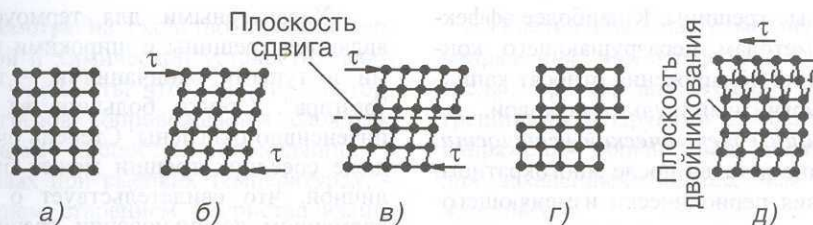


Рис. 13.5. Схема упругой и пластической деформации металла под действием напряжения сдвига τ :

а – первоначальный кристалл; б – упругая деформация; в – увеличение упругой и появление пластической деформации, вызванной скольжением при нагружении больше предела упругости; г – напряжение, обуславливающее появление сдвига (после сдвига сохранилась остаточная деформация); д – образование двойника

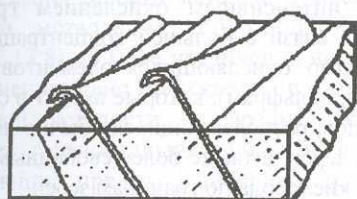


Рис. 13.6. Схема образования экструзии

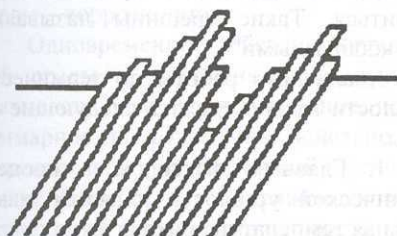


Рис. 13.7. Схема расположения линий скольжения в полосах, вызванных циклическим нагружением (в сечении)

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.

Наиболее характерной чертой усталостного разрушения является отсутствие деформаций в районе разрушения даже в

таких материалах, как мягкие стали, которые высокопластичны при статическом разрушении. И это опасно, так как отсутствует информация о признаках, предшествующих разрушению. Усталостные трещины обычно мелкие и их трудно обнаружить, пока они не достигнут макроскопического размера, 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. Во второй, менее гладкой, зоне трещина распространяется быстрее и поверхность разрушения имеет нерегулярный характер. Третья зона представляет собой поверхность, по которой происходит окончательное разрушение. Эта зона может иметь либо кристаллическую (хрупкое разрушение), либо волокнистую (вязкое разрушение) поверхности.

Всегда есть опасность усталостного разрушения деталей при действии циклических напряжений; поэтому, чтобы избежать разрушений, необходимо выявлять

усталостные трещины. К наиболее эффективным методам неразрушающего контроля для их обнаружения относят капиллярный, магнитный и ультразвуковой.

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 теплосмен (циклов), характерном для повторно-статических нагружений. 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 (когда термические напряжения возникают при пуске и остановке агрегатов) и металлургического оборудования (изложниц, прокатных валков, штампов), 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.

Имеется тенденция к возникновению трещин термоусталости в местах с наиболее окисленными поверхностными слоями.

Внутренние металлургические дефекты могут не оказать 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.

Трещины термоусталости могут иметь местные уширения, когда они пересекают границы зерен, неблагоприятно ориентированные для развития по ним трещин. Указанное явление объясняется более интенсивным окислением границ зерен в связи с большей концентрацией в них легко окисляющихся элементов (молибден, вольфрам), которые входят в состав карбидов, располагающихся обычно по границам зерен, а также более свободным доступом кислорода по границам зерен.

При наличии на пути трещин границы зерна, ориентированной под острым углом к их траектории, трещины могут ветвиться. Такие трещины называются "паукообразными".

Анализируя работы по термической усталости можно сделать следующие выводы.

1. Главным фактором в процессе термической усталости является максимальная температура цикла.
2. Циклы нагрева оказываются более опасными, чем охлаждения, поскольку значение максимальной деформации при растяжении определяется максимальной температурой.
3. Значение остаточной деформации растяжения поверхности определяется временем пребывания изделия при максимальной температуре цикла.
4. Трещины (преимущественно межзеренные) образуются на поверхности изделия.
5. Предотвращение окисления поверхности изделий способствует повышению стойкости металла.
6. Хрупкие материалы с ограниченной областью пластичности наиболее склонны к такому виду разрушения.

Несмотря на сходство явлений термической и химической усталости, необходимо учитывать, что действие повторных нагревов сопровождается сложным комплексом процессов, проходящих в материалах при высоких температурах, — окислением, старением, рекристаллизацией, ползучестью.

Трещины коррозионной усталости.

Коррозионная усталость проявляется при одновременном воздействии на металл циклических напряжений и коррозионных сред. Характеризуется понижением предела выносливости металла. Кривая усталости металла в коррозионной среде (рис. 13.8) по мере увеличения числа циклов непрерывно понижается, в отличие от кривой усталости на воздухе, которая имеет горизонтальный участок, соответствующий пределу выносливости. С увеличением напряжения увеличивается роль механического фактора, с уменьшением напряжения и увеличением 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.

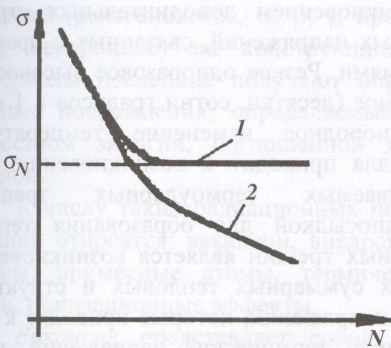


Рис. 13.8. Кривые усталости металла на воздухе (1) и в коррозионной среде (2): σ — напряжение; N — число циклов нагружения; σ_N — предел выносливости на воздухе

Увеличение частоты переменного напряжения интенсифицирует влияние среды, причем для изделий с порами, трещинами и другими концентраторами напряжений больше, чем для гладких, а для закаленных больше, чем для отожженных.

Причины коррозионной усталости — локализация электрохимических анодных процессов (при коррозии в растворах электролитов) и химических процессов (при газовой коррозии) на участках концентрации механических напряжений (поры, трещины, скопления вакансий, дислокаций и т.п.).

Повреждению подвержены в большей или меньшей степени все конструкционные сплавы на основе железа, алюминия, никеля, меди и других металлов.

Одна из особенностей коррозионной усталости углеродистых и низкоуглеродистых сталей — повышение условного предела выносливости по мере увеличения размера деталей (при испытании на воздухе наблюдается обратная закономерность). Эта инверсия указанной закономерности наиболее заметна при увеличении размеров деталей до 50 ... 60 мм.

Коррозионно-усталостное разрушение начинается, как правило, после существенного повреждения поверхности, образования на ней язв, каверн и межкристаллитной коррозии. От этих очагов может практически одновременно начаться развитие многих трещин. Коррозионно-усталостные трещины — это в большинстве случаев многочисленные трещины, разветвляющиеся по мере роста и заканчивающиеся пучками, напоминающими корневую систему растений. Они менее ориентированы, чем при усталостном разрушении без коррозионного влияния среды. При коррозионно-усталостном нагружении разрушение может проходить как по границам, так и по телу зерен.

Трещины контактной усталости.

Особый вид разрушения представляют собой контактные усталостные выкрашивания, образующиеся на поверхности ме-

таллических 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 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.

В условиях переменного контакта на поверхностях деталей образуются развальцованные языки, более твердые по сравнению с основным материалом из-за деформационного упрочнения. Сильная развальцовка языков может привести к образованию следов сдвига, которые могут быть местами зарождения усталостных трещин. Увеличенные за счет деформации, при развитии усталости, языки (или чешуйки) могут быть вырваны в результате действия тангенциальных растягивающих сил.

Причиной образования питтинга служат местные перегрузки или недостаточная смазка. Только большие силы трения могут привести к образованию длинных деформационных языков, которые вызывают питтинговое разрушение боковых сторон зубьев шестерен.

Питтинги могут быть обнаружены при приработке боковых сторон зубьев еще до эксплуатации. Они связаны с наличием локальных выступов на поверхности, которые развальцовываются до небольших языков, отрываются без образования усталостных трещин, и оставляют на боковой стороне зуба плоский отпечаток с гладкой поверхностью.

Кавитационное растрескивание.

Кавитация означает образование полости на поверхности твердого тела при разрушении газообразных пузырьков. Лопаю-

щиеся пузырьки производят разрушения в слое металла на границе с жидкостью. Усталостная кавитация наблюдается, когда колеблющаяся стенка граничит с жидкостью (например в циклически нагружаемых подшипниках скольжения).

13.1.4. РАСТРЕСКИВАНИЕ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТЕРМИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Термические напряжения – это напряжения, возникающие в связи с изменением теплового состояния металла изделия при его нагреве, охлаждении, а также длительном пребывании при повышенной или пониженной температуре.

Разрушения под действием термических напряжений происходят только вследствие теплового градиента, без приложения внешней механической нагрузки. Причиной возникновения трещин при этом является образование локальных полей напряжений.

Каждое изменение температуры из-за перепада температур по сечению изделий вызывает даже в не имеющих превращений металлах и сплавах существенные тепловые напряжения. Если к тому же температура превышает температуру превращения, то образуются новые фазы и модификации, имеющие различные удельные объемы. Это сопровождается возникновением дополнительных структурных напряжений, связанных с превращениями. Резкое одноразовое высокоскоростное (десятки, сотни градусов в 1 с) и неоднородное изменение температуры металла приводит к возникновению так называемых термоударных трещин. Предпосылкой для образования термоударных трещин является возникновение таких суммарных тепловых и структурных напряжений, которые приводят к появлению термических напряжений, превышающих временное сопротивление.

В участках изделия, примыкающих к поверхности, при охлаждении возникают растягивающие напряжения, в глубине

изделия – сжимающие. В начальной стадии напряжение в резко охлажденном тонком внешнем слое очень велико, поскольку зоны материала, расположенные в глубине, допускают деформацию только в ограниченной степени.

Действие таких термических напряжений, например, растрескивание при закалке, может проявляться не в момент изменения теплового состояния (охлаждения), а спустя некоторое время (иногда спустя несколько суток) в результате постепенного накопления напряжений, возникающих при изменении удельных объемов структурных составляющих металла.

Общий уровень остаточных термических напряжений зависит от предела текучести материала, его модуля упругости E , коэффициента теплопроводности, формы изделия, температурного градиента и продолжительности (резкости) охлаждения.

Действие термических напряжений усиливается при наличии резких изменений сечений изделия (выточки отверстия и пр.) и дефектов металла, концентрирующих тепловые напряжения.

13.1.5. РАДИАЦИОННЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

При воздействии ионизирующих излучений (рентгеновское, α , β , γ , протонное, нейтронное) на конструкционные материалы последние получают определенные повреждения, определяемые количеством энергии, поглощенной материалом.

К числу таких радиационных повреждений относятся: вакансии, внедренные атомы, примесные атомы, термические пики, ионизационные эффекты.

Вакансия представляет собой узел решетки, в котором в результате взаимодействия с излучением отсутствует атом. Образуются в твердых телах при столкновении быстрых нейтронов, осколков деле-

ния ядер и других быстрых частиц с атомами решетки.

Внедрившиеся в междоузлия атомы – атомы, сместившиеся из своих устойчивых положений в решетке.

Примесные атомы образуются в результате ядерных реакций, протекающих при захвате нейтронов ядром атома (радиационное легирование). Внедряясь в решетку облучаемого вещества, они могут значительно изменять его свойства.

Термические пики обусловлены колебаниями узлов решетки вдоль пути движения быстрых либо заряженных частиц, выбитых из своего места атомами решетки. В локальных объемах ($\approx 10^{-17}$ см³) возникают большие перегревы (до 10^3 К).

Ионизационные эффекты наблюдаются, когда ионизирующие излучения, проходя через вещество, вызывают в нем ионизацию, следствием чего является разрыв химических связей, образование радикалов и т.д.

Облучение металлов увеличивает подвижность атомов и ускоряет фазовые и структурные превращения, ограничивает число активных полос скольжения, увеличивает число дислокаций, движущихся через полосы скольжения, что в конечном итоге приводит к упрочнению и охрупчиванию металлов.

Нейтроны, помимо образования дефектов кристаллической решетки в результате смещения атомов, могут захватываться атомными ядрами с последующим превращением этих ядер в новые (примесные) элементы. Непрерывное образование новых, химически нежелательных, атомов в сложных сплавах при облучении может оказать значительное влияние как на механические свойства, так и на металлургическую стабильность сплавов. Однако для большинства конструкционных материалов количество примеси, внесенной таким образом, меньше уже присутствующей.

Ядерные превращения становятся металлургически важными, когда в результате образуются такие продукты, как

гелий и другие благородные газы, не растворяющиеся в решетке.

Если произойдет пресыщение кристаллической решетки этими атомами в результате продолжительного облучения, они могут либо начать взаимодействовать с соседними мигрирующими вакансиями с образованием простых агрегатов, либо гомогенно накапливаться с образованием газовых пузырей на границах зерен.

Образующийся при облучении водород способствует охрупчиванию металлов.

Слияние вакансий способствует формированию пустот (радиационная пористость) и вызывает заметное распухание и коробление металла.

Физические и химические неоднородности (различного типа дефекты, примесные атомы), возникающие при облучении металлов, существенным образом изменяют их свойства (возрастает удельное электросопротивление; повышается склонность к коррозионному растрескиванию; металлы охрупчиваются: предел текучести, предел прочности, твердость возрастают, пластичность снижается; падает значение длительной прочности).

Радиационная стойкость материала – это способность материала сохранять исходный химический состав, структуру и свойства в процессе облучения и (или) после воздействия ионизирующих излучений. Количественно характеризуется максимальным значением поглощенной дозы (Грей), при которой материал становится непригодным для конкретных условий применения.

Радиационная стойкость конструкционной стали имеет значение около $5 \cdot 10^7$ Гр.

Предварительная радиационно-термическая обработка – облучение и отжиг – позволяет увеличить радиационную стойкость в 10 ... 15 раз.

При исследовании металлов на радиационную стойкость наиболее чувствительным является метод измерения электросопротивления, т.к. их электрическое сопротивление возрастает за счет образования радиационных дефектов.

Ниже в сжатой форме представлены процедуры визуального и измерительного контроля при техническом диагностировании таких ответственных объектов, как энергетические и авиационно-космические.

13.2. ВИЗУАЛЬНЫЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИ ТЕХНИЧЕСКОМ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

При визуальном контроле состояния основного материала и сварных соединений оборудования и трубопроводов проверяют:

- отсутствие (наличие) механических повреждений поверхностей;

- отсутствие (наличие) формоизменения изделий (деформированные участки, коробления, провисание, выход трубы из ряда и других отклонений от первоначального расположения);

- отсутствие (наличие) трещин и других поверхностных дефектов, образовавшихся (получивших развитие) в процессе эксплуатации;

- отсутствие коррозионного и эрозийного дефектов поверхностей;

- отсутствие наружного износа изделия (оборудования, трубопровода, поверхностей нагрева котла и других изделий).

При измерительном контроле состояния основного материала и сварных соединений оборудования и трубопроводов определяют:

- размеры механических повреждений основного материала и сварных соединений;

- размеры деформированных участков основного материала (сварных соединений), в т.ч. длину, ширину и глубину вмятин, выпучин, отдулин;

- овальность цилиндрических элементов, в т.ч. гибов труб;

- прямолинейность (прогиб) образующей изделия;

- физическую толщину стенки основного материала;
- глубину коррозионных язв и размеры зон коррозионного повреждения, включая их глубину.

Разметку точек замера толщины стенок рекомендуется проводить краской или мелом. Замер фактической толщины стенок изделий выполнять ультразвуковым методом.

Визуальный контроль основного материала изделий и сварных соединений на стадии технического диагностирования выполняют с целью подтверждения отсутствия поверхностных повреждений (трещин, коррозионных повреждений, деформированных участков, наружного износа элементов и т.д.), вызванных условиями эксплуатации изделий.

Измерительный контроль основного материала изделий и сварных соединений на стадии технического диагностирования проводят с целью подтверждения соответствия геометрических размеров изделий и допустимости повреждений основного материала и сварных соединений, выявляемых при визуальном контроле, требованиям рабочих чертежей, ТУ, стандартов и паспортов.

13.3. ВИЗУАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Назначение визуально-оптического контроля авиационной техники

Визуально-оптический контроль является наиболее простым, доступным и наиболее экономичным методом обнаружения поверхностных дефектов разнообразных типов на деталях и узлах авиационной техники. Этот контроль применяют на различных стадиях изготовления самолетов, вертолетов и двигателей, в условиях эксплуатации, а также при их ремонте. В условиях эксплуатации авиационной техники визуально-оптический контроль выполняют при плановых регламентных

работах, при предполетном и послеполетном осмотрах, а также при неплановых целевых осмотрах, проводимых в случаях аварий на технике. Простая технология контроля, несложное оборудование, как правило, малая трудоемкость, возможность быстрой подготовки кадров – основные достоинства этого метода.

Визуально-оптический контроль применяют:

- для поиска поверхностных дефектов – трещин, коррозионных и эрозионных повреждений, забоин, язв, расслоений, открытых раковин и т.п. на деталях и узлах, доступных для непосредственного осмотра;

- для обнаружения крупных трещин, мест разрушения и остаточной деформации скрытых или удаленных деталей и элементов конструкций, загрязнений, а также различных посторонних предметов внутри закрытых конструкций;

- для выявления зон изменения структуры материалов и их физико-химических свойств, вызывающих изменение оптических свойств поверхности деталей (цвета, яркости, блеска), например, мест перегрева конструкций по изменению цвета металла или покрытия;

- для обнаружения течей топливных и масляных баков, трубопроводов и их резьбовых соединений, пробок, заглушек и т.п.;

- для поиска более мелких трещин (по сравнению с трещинами, выявляемыми невооруженным глазом) при цветном, люминесцентном и магнитопорошковом контроле;

- для анализа характера и определения типа поверхностных дефектов, обнаруженных при контроле деталей вихревым, ультразвуковым или другим методом неразрушающего контроля.

Однако, визуально-оптический метод имеет низкую достоверность при поиске усталостных трещин на лопатках газотурбинных двигателей и на других деталях, где размеры трещин, которые необходимо

обнаруживать, малы, а также низок яркий контраст дефектов с поверхностью деталей. Велики трудозатраты на контроль лопаток двигателей.

Основные объекты визуального и оптического контроля авиационной техники

В условиях эксплуатации авиационной техники осмотру подвергают элементы конструкции планера, детали и узлы двигателей и турбостартеров с учетом возможности появления на них дефектов эксплуатационного характера, что обусловлено сроками эксплуатации деталей и узлов, уровнем действующих рабочих напряжений, рабочей температурой и другими факторами. На планере самолетов визуально-оптическому контролю, как правило, подвергают:

- элементы оперения: панели крыла в наиболее нагруженных зонах,
- аэродинамические гребни, узлы навески рулей, элеронов, триммеров и закрылков, стыковочные узлы, стыковочные болты центроплана и т.п.;
- детали и узлы шасси: узлы крепления гондол и подкосов, цилиндры створок, детали механизма синхронизации стоек, сварные швы амортизационных стоек, барабаны, съемные реборды, обоймы подшипников авиационных колес и др.;
- элементы подвески двигателей: узлы крепления мотогондол, подкосы и кронштейны подвески двигателей, конструктивные элементы воздухозаборников: каналы, болты крепления съемных частей, клапаны механизации;
- детали системы управления самолетом: качалки, кронштейны, концевые участки тяг, монорельсы, узлы крепления гидро- и электроагрегатов, а также звенья колонок управления;
- детали воздушных винтов: кромки лопастей винтов, обтекатели кока, замки обтекателей, хомуты стаканов и шлицевые валы.

У газотурбинных двигателей визуально-оптическому контролю в основном

подвергают детали и узлы газовоздушного тракта: лопатки и диски ротора и статора турбины и компрессора, корпуса камер сгорания, жаровые трубы, головки завихрителей, теплозащитные экраны топливных коллекторов и т.д. На лопатках, как правило, осматривают входные и выходные кромки, торцы или бандажные полки пера. У турбостартеров проверяют рабочие лопатки турбины и компрессора.

Программы осмотра конструкции самолетов в эксплуатации

Порядок проведения работ по техническому обслуживанию и контролю самолетов в условиях эксплуатации направлен на обеспечение их наиболее продолжительного и безопасного срока службы. Этот порядок и перечни осматриваемых деталей и узлов определяются типом обслуживаемой техники, опытом ее испытаний в процессе разработки конструкции, наличием встроенных средств контроля, типом наружных (невстроенных) средств неразрушающего контроля, их мобильностью, традициями фирмы-разработчика объекта контроля и другими факторами. Этот порядок может быть разным. Однако, в программах технического обслуживания различных объектов техники используются некоторые общие принципы применения средств неразрушающего контроля, в том числе оптических приборов. Они заключаются в следующем.

Частые проверки предусматривается выполнять визуально. Проверки с большей периодичностью проводят с применением инструментальных средств контроля, включая оптические приборы. Чаще проверяются высоконагруженные и другие ответственные детали и узлы.

При большой наработке, в связи с появлением и развитием усталостных и термических трещин, коррозионных и эрозийных поражений и расслоений, предусматривается увеличение числа контролируемых деталей, узлов и агрегатов и усиление тщательности и частоты проверок, внедрение комплексного контроля с

использованием нескольких дополняющих друг друга методов.

Для стареющих типов техники со сроками эксплуатации 20 ... 30 и более лет разрабатывают специальные программы оценки ее состояния, предусматривающие расширение области применения средств контроля. При этом на неразрушающий контроль, например, самолетов, планируют до 60 % эксплуатационных трудозатрат. Из них иногда до 40 % трудозатрат приходится на визуально-оптический контроль. Основной объем контроля в эксплуатации выполняют непосредственно на объектах техники без их разборки. Небольшую часть деталей и узлов для контроля демонтируют. Плановый комплексный контроль техники выполняют, как правило, на специализированных базах технического обслуживания. Визуально-оптический контроль проводят как на базах, так и непосредственно в местах использования техники.

Общие требования к приборам для визуального и оптического контроля авиационной техники

Условия эксплуатации приборов для визуально-оптического контроля авиационной техники в зависимости от их назначения весьма разнообразны. Приборы цехового назначения, как правило, применяются при незначительных колебаниях температуры в пределах от +15 до +20 °С, при практически постоянном атмосферном давлении, невысокой и мало изменяющейся влажности, при относительно постоянных механических воздействиях. В полевых условиях приборы эксплуатируются при колебаниях температуры от +55 до -60 °С, при значительной тряске во время перевозок, сильных вибрациях и ударах. Некоторые приборы испытывают воздействие воды, снега, паров органических растворителей и авиационного топлива, а также высокой температуры.

Конструкция оптических приборов должна обеспечивать при всех условиях эксплуатации, включая температурные

колебания, полную работоспособность и заданный предел разрешения. В приборах должны быть предусмотрены устройства для уменьшения отрицательного влияния колебаний температуры и воздействия рассеянного света на глаза контролера (бленды, диафрагмы, светопоглощающая отделка деталей), а также для устойчивого и прочного крепления деталей и узлов. На авиационной технике не допускается применение оптических приборов, отдельные элементы которых могут самопроизвольно отделяться и попадать внутрь конструкции летательных аппаратов. Полости многоэлементных оптических приборов должны иметь достаточную герметизацию. В приборах, используемых в полевых условиях, должны применяться коррозионно-стойкие 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 быстросъёмных деталей;
- малой массой и удобством переноски приборов, возможностью их быстрого перевода из транспортного положения в рабочее и обратно.

Важное значение имеют внешний вид и форма приборов, особенно эндоскопов. 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 авиационной техники, 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 деталей и узлов.

Виды оптических приборов, применяемых для осмотра авиационной техники и их технические возможности

Использование оптических приборов при визуально-оптическом контроле позволяет увеличить изображение дефектов, которые не обнаруживаются невооруженным глазом, и обеспечить контроль областей, недоступных непосредственному осмотру. Визуальные оптические приборы, используемые для поиска дефектов в узлах и конструкциях авиационной техники, по назначению разделяют 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 контроля удаленных объектов, т.е. расположенных далее 250 мм;

3) приборы для контроля скрытых объектов — деталей, закрытых от прямого наблюдения другими деталями и конструкциями, внутренних поверхностей полых деталей и отверстий.

При контроле близко расположенных объектов применяют лупы различных типов. Лупа — это один из наиболее простых оптических приборов. Она представляет собой короткофокусную двояковыпуклую линзу или систему линз, действующих как одна собирающая линза. Как и другие оптические приборы, 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, повышается усталость глаз, снижается производительность и достоверность контроля. В связи с этим для осмотра деталей и узлов летательных аппаратов применяют оптические приборы небольшого увеличения, обычно в пределах от $1,5\times$ до $10\times$ крат.

Для контроля авиационной техники наиболее широко используют обзорные, складные карманные и бинокулярные напольные лупы. Обзорные лупы (типа ЛПК-471, ЛПК-470 и др.) имеют большой световой диаметр и, соответственно, большое поле зрения. Они позволяют проводить общий осмотр больших поверхностей при увеличении $1,25 \dots 2\times$.

Из-за большого светового диаметра они могут применяться для бинокулярного наблюдения. Складные карманные од-

нолинзовые лупы типа ЛП1 с увеличением 2,5^x; 4^x и 7^x крат используются для осмотра малых зон деталей и анализа характера обнаруженных дефектов. Для этих же целей применяются апланатические лупы типа ЛАЗ, склеенные из трех линз, с увеличением 6^x и 10^x. Карманная лупа ЛАЗ 20-кратного увеличения по указанным выше причинам для осмотра авиационных деталей не используется.

Биноклярные налобные лупы БЛ-1 и БЛ-2 имеют увеличение 1,25 ... 2^x. Лупа БЛ-2 снабжена осветителем с лампой накаливания. Эти лупы применяют в тех случаях, когда при осмотре деталей требуется, чтобы руки были свободны для выполнения каких-либо действий, например, когда детали при осмотре необходимо держать руками или поворачивать.

С помощью луп можно обнаруживать контрастные трещины, коррозионные и эрозийные поражения, поры, раковины, забоины, риски, надрывы, надирь трущихся поверхностей и другие поверхностные дефекты материала деталей, защитных и декоративных покрытий. Лупы позволяют также отличать настоящие трещины от ложных, внешне схожих с трещинами рисок, заусенцев, сколов, окисной пленки, нитевидных загрязнений и т.п.

При контроле удаленных объектов применяют оптические приборы с телескопической системой – телескопические лупы и бинокли. Простейшая телескопическая система состоит из объектива и окуляра. С помощью такой системы наблюдатель видит обратное мнимое изображение объекта. Для получения прямого изображения объекта в телескопическую систему дополнительно вводят промежуточную оборачивающую систему, состоящую из одной или нескольких призм или линз.

Наиболее широко при осмотре авиационной техники используется телескопическая лупа ЛПШ-474. Она представляет собой четырехкратный призмный монокуляр. На его объектив надеваются

сменные объективы-насадки, в зависимости от увеличения которых изменяется общее увеличение лупы от 1^x до 40^x и рабочее расстояние от 25 мм до бесконечности. Одновременно с этим изменяются световой диаметр и линейное поле зрения лупы.

Бинокли применяют в основном для осмотра элементов конструкции крупногабаритных, тяжелых самолетов. Используются как призмные, так и галилеевские бинокли с увеличением от 3^x до 18^x. Бинокли наиболее эффективны при осмотре деталей, находящихся в пределах прямой 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 и узлы 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.

К эндоскопам относятся жесткие или гибкие оптические приборы с закрытой оптической системой, т.е. расположенной в корпусе, которые создают увеличенное, как правило, в 1,5 ... 2,5^x изображение осматриваемого объекта. Имеются эндоскопы диаметром от 2,5 мм до 20 мм и длиной до нескольких метров. Обычно их оптическая система способна обеспечивать разное направление осмотра: прямое, под прямым углом, под косым углом и ретроспективное.

Эндоскопы применяются для осмотра деталей и узлов авиационной техники

через прямые, кривые или ломанные каналы, смотровые отверстия или лючки. 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. Для осмотра авиационной техники наиболее часто используются жесткие эндоскопы типов АС-1, ТС и ЭЛЖ разных размеров.

Гибкие эндоскопы применяются для осмотра деталей, узлов и конструкций через кривые или ломанные каналы. В этих эндоскопах изображение от объектива к окуляру передается по жгуту стеклянного волокна с регулярной укладкой. 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 изгиба ствола эндоскопа в одной или двух плоскостях и изменения направления осмотра.

Большинство эндоскопов имеют объектив с широким углом зрения, обеспечивающим поле зрения в 100° при повороте конца прибора на $+90^\circ$ или $+120^\circ$. 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, IF-6D-1-10, IF-8D-3-15, IF-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 газозвездного тракта газотурбинных двигателей.

Выбор освещения деталей и узлов авиационной техники при визуальном-оптическом контроле

Эффективность визуальном-оптического контроля в большой степени зависит от освещенности осматриваемых деталей и направления освещения. Детали освещают переносными лампами 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 визуальном-оптического контроля необходимо обеспечивать высокую освещенность деталей — до 3000 ... 4000 лк. Такая освещенность является непременным условием эффективного контроля.

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 на-

правление 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 лопаток первой ступени ротора компрессора и последней ступени ротора турбины

При использовании оптических приборов переменного увеличения либо комплектов приборов с различным увеличением 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.

Лопатки первой ступени ротора осевого компрессора осматривают со стороны входного канала двигателя, а лопатки последней ступени ротора турбины – со стороны реактивной трубы. Перед осмотром лопатки протирают чистой ветошью, смоченной бензином. Осмотр лопаток проводят с применением обзорных, складных карманных или телескопических луп или биноклей. Положение руки с лупой стабилизируют: при контроле доступных лопаток рукой, держащей лупу, опираются на поверхность проверяемой лопатки; при осмотре удаленных лопаток руку или телескопическую лупу опирают на другие детали, например, на стенку

форсажной камеры, на стойку или конус реактивной трубы.

Бинокль укрепляют на съемном кронштейне. Ротор двигателя при осмотре лопаток медленно вращают. На входных кромках лопаток компрессора обнаруживают, как правило, забоины различной формы и размеров.

Для обнаружения различных повреждений на выходных кромках лопаток первой ступени ротора компрессора используют тонкое плоское зеркало прямоугольной формы с отвинчивающейся рукояткой. На задней поверхности зеркала установлен закрепляющий элемент в виде ласточкиного хвоста. С помощью рукоятки зеркало устанавливают на входную кромку лопатки направляющего аппарата, расположенной горизонтально позади осматриваемых лопаток, и отвинчивают рукоятку. Направляя свет переносной лампы на зеркало, висящее в зазоре между лопатками ротора и статора двигателя, освещают выходные кромки контролируемых лопаток отраженным от зеркала светом. Вращая ротор, последовательно осматривают выходные кромки всех лопаток первой ступени. Это же зеркало используют при осмотре входных кромок лопаток последней ступени ротора турбины. В этом случае зеркало подвешивают на выходную кромку лопатки соплового аппарата.

Контроль лопаток ротора турбины и компрессора, недоступных прямому наблюдению

Осмотр лопаток второй и последующих ступеней компрессора, лопаток турбины, а также лопаток колец перепуска, не доступных для осмотра со стороны входного и выходного каналов двигателя, проводят с помощью эндоскопов через специальные смотровые окна или лючки. Контроль лопаток ротора выполняют два специалиста, один из которых осматривает лопатки, а второй по его команде проворачивает ротор двигателя. При осмотре каждой лопатки объектив эндоскопа пе-

ремещают вдоль ее кромки. В случае обнаружения дефекта или при подозрении на его наличие лопатку осматривают повторно.

При использовании эндоскопа со сменными окулярами и поворотной объективной призмой, лопатку осматривают при разном увеличении, изменяя направление осмотра. При осмотре могут быть обнаружены забоины от попадания в тракт двигателя посторонних предметов, крупные раскрытые трещины, обрывы пера лопаток, деформация кромок, коррозионные поражения материала лопаток и другие дефекты.

На лопатках кольца перепуска трещины могут быть обнаружены в местах перехода от пера к хвостовику.

При контроле дисков и рабочих лопаток турбины и компрессора на наличие усталостных трещин визуальн-оптический метод мало эффективен. Это объясняется следующим:

а) усталостные трещины имеют малое раскрытие;

б) эти трещины имеют низкий оптический контраст с поверхностью деталей, уровень которого обычно не превышает порог контрастной чувствительности зрения человека. Оптические приборы контраст трещин не увеличивают;

в) усталостные трещины, как правило, скрыты, замаскированы слоем пыли, нагара и другими загрязнениями.

В связи с этим, наряду с визуальн-оптическим методом для контроля лопаток и дисков турбины и компрессора авиационных двигателей с целью поиска трещин применяют вихретоковый или ультразвуковой методы.

Визуально-оптический метод в основном используют для предварительного осмотра лопаток на отсутствие забоин, деформации кромок, прогаров, оплавления, вспучивания материала и других дефектов. При наличии таких дефектов про-

ведение вихретокового или ультразвукового контроля лопаток затруднено.

В отличие от контроля других деталей, процесс контроля деталей газоздушного тракта газотурбинных двигателей трудоемок, что объясняется, главным образом, большим количеством осматриваемых деталей. Например, 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. Поэтому на контроль одного двигателя иногда требуется 3 ... 4 ч. Тем не менее, такой контроль дает большую экономию, так как он выполняется с минимальными демонтажными работами. Контроль с демонтажем деталей потребовал бы значительно большего времени.

Контроль деталей подвески двигателей

Подкосы крепления мотогондол по галтельным переходам в наиболее нагруженных местах проверяют, как правило, магнитопорошковым методом. Кронштейны крепления фермы двигателей контролируют вихретоковым методом. Ферму осматривают с помощью луп 4 ... 7-кратного увеличения. Для обеспечения доступа к ферме открывают крышку на ребрах фермы подвески двигателя капота и снимают крышки с люков для осмотра узлов.

Трещины обнаруживаются обычно в местах резкого изменения сечения фермы.

Контроль барабанов и реборд авиационных колес

При предполетном и послеполетном осмотрах барабаны и реборды авиационных колес контролируют визуально. При выполнении регламентных работ через

каждые 200 ч полетов либо через год эксплуатации проводят визуально-оптический контроль с использованием луп 4 ... 7-кратного увеличения, а на некоторых типах самолетов также вихретоковый контроль с помощью дефектоскопа ВДЦ-3 и специального приспособления. Такой контроль проводят также при каждой смене пневматиков. Одновременно с этим проверяют обоймы, сепараторы и ролики подшипников, шестерни колес и тормозные рубашки. При контроле барабанов и реборд колес основное внимание уделяют галтельным переходам и зонам контакта с пневматиком. В этих местах могут обнаруживаться коррозионные поражения и трещины сложного происхождения: усталостные с элементами коррозии под напряжением и следами термической усталости из-за периодического нагревания колес при каждом торможении.

Виды ложных дефектов, обнаруживаемых при визуально-оптическом контроле

Осмотр деталей с применением оптических приборов требует некоторых особых навыков, умения правильно анализировать получаемое на барабане авиационного колеса с их помощью изображение. Главный из этих навыков – способность различать действительные и ложные трещины. Ложные трещины – это небольшие допустимые повреждения или загрязнения поверхности деталей, внешне схожие с действительными трещинами. В виде ложных трещин на деталях авиационной техники, например, на рабочих лопатках турбины газотурбинных двигателей, могут быть обнаружены сколы поверхностного алитированного слоя или окисной пленки в виде резких изменений толщины слоя или пленки на входных кромках лопаток. На этих же лопатках

турбины и на других деталях, в частности, на лопатках компрессора, могут быть выявлены:

- риски и царапины – следы от абразивных частиц, попадающих в двигатель с воздушным потоком;
- цепочки мелких допустимых точечных эрозионных поражений и забоин, сливающихся в сплошные линии.

На лопатках компрессора могут быть обнаружены также следующие ложные трещины:

- смолистые отложения – линейные следы полимеризовавшегося 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 изображения. При этом обычно обращают внимание на следующие признаки:

- место расположения предполагаемого дефекта 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 трещины в виде загрязнений, смолистых отложений или коррозионных поражений чаще всего располагаются на корыте пера лопаток и вытянуты по направлению воздушного потока;

– цвет линий рисунка. Действительные трещины всегда имеют черный цвет. Цвет ложных трещин может отличаться от черного: отложения пыли могут быть серого или желто-серого цвета, смолистые отложения, как уже указано, темно-коричневого, продукты коррозии стали – буро-красного и т.д.;

– геометрия рисунка. Действительные трещины, как правило, имеют характерные изломы и изгибы, которые могут быть заметны даже при осмотре невооруженным глазом, а на деталях из мелкозер-

нистых сплавов – при осмотре под увеличением. Отложения пыли, шлейфовая коррозия, смолистые отложения имеют вид прямых или плавно изгибающихся линий, без изломов;

– микрорельеф поверхности. 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.

Знание этих признаков позволяет предотвращать необоснованную браковку деталей и ошибочное отстранение летательных аппаратов от полетов.

Глава 14

ВЗАИМОСВЯЗИ СИСТЕМ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ С ДРУГИМИ СИСТЕМАМИ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Почти все используемые в настоящее время системы НК обладают некоторыми общими характеристиками.

Во-первых, объекты, подлежащие контролю различными методами, дефекты в них и причины их возникновения часто одни и те же. Дефекты, выявляемые одним методом, могут служить основой для получения априорных сведений, необходимых для их интерпретации другими методами.

Во-вторых, информационные модели дефектов, регистрируемые многими методами НК, анализируются и интерпретируются визуально. В связи с этим почти любой метод НК может считаться визуальным, в частности, на стадиях выявления и интерпретации. У некоторых методов НК связь с чисто визуальным методом еще более прямая.

Критерии видимости дефектов оговариваются для магнитопорошкового и капиллярного методов и некоторых методов течеисследования. Выявление и распознавание дефектов происходит, как правило, в условиях различных мешающих факторов (вуаль, возникающая на рентгеновском снимке, вызванная рассеянным излучением; вуаль, вызванная осадками магнитного порошка на шероховатой поверхности, создающей локальные магнитные поля и т.п.). Уровни освещенности индикаций, размеры частиц — дефектоскопических материалов, углы зрения, чувствительность к свету и многие другие факторы, относящиеся к зрению дефектоскописта, строго контролируются для обеспечения надежности и точности как визуального контроля, так и других методов НК.

Обучение операторов-дефектоскопистов различным методам НК заканчивается, как правило, только тогда, когда надежность контроля становится достаточно

высокой и устойчивой. Для интерпретации данных в различных методах неразрушающего контроля дефектоскопист должен знать физические основы того или иного метода, аппаратуру и условия ее оптимального функционирования и иметь достаточный опыт в применении этого метода. Другими словами, визуальный аспект важен, но недостаточен.

Тесная связь между системой визуального контроля с другими системами 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. Увеличители активно применяются как при визуальном контроле поверхностей изделий, так и при анализе рентгенограмм.

Оптические элементы используются почти во всех автоматизированных системах НК. Увеличение контраста изображений дефектов, подавление шума и применение различных программ обработки данных, получаемых в различных системах НК, тесно связаны со свойствами органа зрения человека.

Зрение человека — это основа НК и визуальный контроль прямо или косвенно связан со всеми методами НК.

14.1. ВИЗУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ

Качество анализируемого изображения при радиационном контроле определяется совокупностью многих параметров: энергетических (перенос мощности дозы, яркость экрана и т.п.), пространственных (предел разрешения, дисторсия и т.п.), статистических (флуктуационных)

(минимальный контраст, отношение сигнал/шум, динамический диапазон и т.п.) и временных (инерционность, динамическая нерезкость и т.п.).

В рентгеновском и гамма-диапазоне энергия каждого фотона очень велика, поэтому количество фотонов, обеспечивающих перенос заданной на детектор энергии, соответственно мало, статистические флуктуации общего числа зарегистрированных фотонов как фонового излучения, так и полезного сигнала таким образом, служат сильнейшим ограничением качества радиационных систем. Для сравнения укажем, что типичная фотографическая пленка использует $10^{11} \dots 10^{12}$ световых фотонов/см², рентгеновская, с флюоресцентным экраном, всего – 10^7 световых фотонов/см².

Любая информация, которую требуется извлечь из окружающего мира с использованием радиационных систем, оказывается ограниченной в силу дискретной природы фотонов, их конечных порций, участвующих в информационном процессе, хаотичным характером их распределения во времени и пространстве и наличием ложных сигналов. Важными характеристиками элементов радиационных систем контроля в указанных выше условиях считаются квантовая эффективность и коэффициент усиления.

Квантовую эффективность (обобщенный квантовый выход) элементов регистрации систем радиационного контроля определяют отношением:

$$Q_D = [(ОСШ_{\text{вых}})/(ОСШ_{\text{вх}})]^2,$$

где $ОСШ_{\text{вых}}$ – отношение сигнала к шуму на выходе элемента регистрации; $ОСШ_{\text{вх}}$ – отношение сигнала к шуму на входе элемента регистрации.

Квантовая эффективность человеческого глаза меняется примерно от 0,1 при низких освещенностях до нескольких сотых при высоких освещенностях.

Рабочая чувствительность фотографических пленок при взаимодействии со световыми фотонами соответствует кван-

товой эффективности 0,01, а рентгеновских пленок при взаимодействии с рентгеновскими и гамма- фотонами – ниже указанного значения. Современная рентгенотелевизионные установки и передающие телевизионные трубки работают с квантовой эффективностью от 0,1 до, примерно, 1,0.

Непосредственно на сетчатке имеется биохимический усилитель с коэффициентом усиления около 10^6 , который преобразует малую энергию падающих фотонов в значительно большую энергию зрительных нервных импульсов. При каждом уровне освещенности коэффициент усиления оказывается в точности таким, чтобы фотонный шум был едва различим или, лучше сказать, почти неразличим. Аналогично усиление рентгенотелевизионной установки следует выбирать так, чтобы шум находился на пороге видимости. Изменениями коэффициента усиления объясняется явление темновой адаптации и ряд других эффектов.

В системах радиационного НК иногда используются флюороскопы, которые содержат как минимум рентгеновский излучатель, флюоресцентный экран и защитные устройства. Они обычно функционируют при уровнях яркости экранов $3 \cdot 10^{-4} \dots 3$ кд/м², поэтому при оптимизации воспринимаемой человеком информации из изображений такой яркости необходимо использовать основные положения оптики, относящиеся к глазу, адаптированному к малым яркостям. Переход от дневного зрения к ночному происходит на уровне 0,06 кд/м². Такие важные характеристики зрения человека как острота зрения и пороговый контраст в значительной мере зависят от яркости фона анализируемого изображения. Яркость экранов флюороскопов часто бывает ниже уровня 0,06 кд/м². Острота зрения повышается при увеличении яркости изображения и достигает заметного уровня при переходе от ночного зрения к дневному. При уровне яркости 0,06 кд/м² две отдельные точки видны под углом зрения

1,8'. При наблюдении экрана с расстояния 250 мм это соответствует разрешению 0,13 мм.

Наименьший пороговый контраст ($\Delta B/B = 0,01 \dots 0,02$) достигается в широком диапазоне яркостей фона изображения (примерно $1 \dots 1 \cdot 10^3$ кд/м²). Увеличение порогового контраста при очень малых яркостях ($\Delta B/B \approx 0,04$ при $B \approx 0,06$ кд/м²) объясняется флуктуациями яркости. Темновая адаптация требуется тогда, когда яркость экрана меньше 0,3 кд/м².

Чтобы обнаружить контрастность в 1 %, при наблюдении в условиях яркости в 0,3 кд/м², требуется темновая адаптация в течение примерно одной минуты. Темновая адаптация приводит не только к расширению зрачка, но и к повышению его светочувствительности и коэффициента усиления. Ночное зрение начинает функционировать примерно через 10 мин адаптации, но характеристики зрения будут улучшаться в течение 30 мин адаптации. На практике достаточно адаптации в течение 20 мин. Чтобы поддерживать глаз в рабочем состоянии обычно пользуются красным светом в помещении и очками с красными светофильтрами за пределами зоны контроля.

Для палочек сетчатки глаза, приспособленных видеть в темноте, красный цвет – все равно что черный. Если взять два листа бумаги, скажем, красный и синий, то в полутьме синий будет казаться ярче красного, хотя при хорошем освещении красный листок гораздо ярче синего. Описанное явление называется эффектом Пуркинье.

Тот факт, что зрение в темноте осуществляется с помощью палочек, а в окрестности желтого пятна палочек нет, проявляется еще в том, что мы видим в темноте элементы изображения, находящиеся прямо перед нами, не столь отчетливо, как элементы, расположенные сбоку.

При расшифровке радиограмм яркость их светотеневых изображений лежит в пределах $10 \dots 1 \cdot 10^3$ кд/м².

Сложность процесса расшифровки можно оценить на основе неполного перечня факторов, влияющих на этот процесс.

Характеристики ОК: форма, толщина, материал, ориентация, наиболее вероятные типы дефектов.

Характеристики средств контроля: источника излучения, регистрирующих средств и методов их обработки.

Характеристики картины: яркость фона, плотность помех и ложных сигналов.

Характеристики оператора: острота зрения, тренированность, мотивировка действий, утомление, получение предварительного инструктажа, интеллект, индивидуальные особенности, рабочая нагрузка; метод поиска.

Разнородные факторы: освещенность в помещении, шумы и вибрация, время расшифровки.

Следует отметить, что оператор обнаруживает изображения дефектов вероятностным образом. Разброс по отдельным опытным расшифровщикам радиографических снимков в способности извлекать информацию из снимков составляет около 30 %. Очевидно, что даже при самых лучших возможных условиях обучения и опыта квалифицированные расшифровщики изображений на пленках вряд ли достигнут согласия более, чем в 90 ... 95 % случаев. Поэтому, во всех случаях, когда качество готовой продукции является важным фактором безопасности, минимум два квалифицированных оператора должны оценивать качество ОК по снимкам и выносить заключение.

Контрольные радиографические снимки являются ценным пособием при обучении и расшифровке. Кроме этого, рекомендуется иметь собственную библиотеку радиографических снимков и соответствующих фотографий микрошлифов дефектных участков ОК.

Острота зрения является существенным параметром для первого этапа трехэтапного процесса расшифровки: обнару-

жение, опознавание, оценка. Острота зрения человека может меняться и действительно меняется изо дня в день в зависимости от физиологических факторов. Понимание этого стимулирует ежедневную проверку остроты зрения, например, с помощью диапозитивов, на которых имеются изображения линейчатых дефектов с резкими и размытыми очертаниями.

Условия для просмотра снимков также имеют крайне важное значение при расшифровке. Освещение помещения должно осуществляться таким образом, чтобы не было никаких отражений от поверхности дешифруемого снимка. Мягкое освещение предпочтительнее полной темноты. На любой стороне устройства для просмотра должна иметься достаточная поверхность стола для размещения пленки и записи результатов расшифровки. Кроме того, должен быть обеспечен легкий и быстрый доступ к денситометру, контрольным снимкам, нормам, стандартам и техническим условиям. Важно, чтобы для поддержания сосредоточенности расшифровщика ничто его не отвлекало: телефон, разговоры и т.п.

Следует использовать негатоскопы с регулируемой яркостью и размерами освещенного поля. Обычно негатоскопы классифицируются на четыре группы: для локального просмотра снимка (диаметр освещенного поля 7 ... 10 см); просмотра ленточной рентгеновской пленки; просмотра больших площадей (35 × 45 см); комбинированные (локальный просмотр больших площадей). Экран негатоскопа должен быть чистым и без поверхностных пороков с обеих сторон. Изображение на рентгеновских пленках можно эффективно оценивать при помощи увеличительных устройств: лупа с ценой деления 0,1 мм и менее, увеличитель на штативе и т.п.

Рядом с расшифровщиком могут быть размещены: восковые карандаши, ручки, линейки на прозрачной основе, карманный фонарь для идентификации поверхностей пленок, перчатки, графики, таблицы и т.п.

Первый этап просмотра пленки требует оценки качества радиографического изображения. Это включает определение следующих факторов: содержит ли снимок пятна, полосы, загрязнения и повреждения эмульсионного слоя; имеется ли на снимке изображение ограничительных меток, маркировочных знаков, эталона чувствительности; в заданных ли пределах находится оптическая плотность почернения на снимке.

Следующий этап состоит в оценке качества ОК по снимку. Именно на этом этапе индивидуальная острота зрения и опыт оператора, а также понимание им процесса получения снимка становятся доминирующим фактором.

Так как глаз более восприимчив к движущимся элементам изображения, небольшие движения снимка помогают обнаруживать мелкие детали изображения. Размещение пленки под углом или изменение угла зрения повышает контрастность малоконтрастных элементов изображения. Как уменьшение углового размера освещенного поля, так и использование увеличительных приборов помогает объективности оценки качества ОК. С другой стороны большие угловые размеры освещенного поля позволяют повысить точность диагностирования узлов и механизмов по снимкам.

Уровни оптической плотности почернения элементов изображения снимка существенно влияют на выполнение оценки качества ОК. Измерение плотности почернения проводят с помощью денситометров, позволяющих оценивать оптическую плотность изображений с размерами 1 ... 3 мм; микроденситометров и микрофотометров, дающих возможность измерять оптическую плотность на деталях снимков до 3 мкм.

В настоящее время в радиационном НК широко используется цифровая обработка изображений, сформированных как пленочными системами, так и с помощью рентгенотелевизионных установок и рентгеновских компьютерных сканеров, фор-

мирующих изображения как с использованием первичных, так и рассеянных объектов контроля фотонов. Если изображение переведено в цифровую форму, можно использовать большое разнообразие методов как его улучшения, так и анализа.

14.2. ВИЗУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

Ультразвуковой метод позволяет выявлять дефекты различного происхождения практически во всех сталях и сплавах, из которых изготовлены детали и узлы почти во всех отраслях машиностроения. Важным достоинством метода является возможность выявления при одностороннем доступе к изделию внутренних дефектов, расположенных на большой глубине или выходящих на недоступную поверхность.

При использовании ультразвукового метода требуется, как правило, разработка специальных преобразователей, дополнительных устройств, конкретных методических рекомендаций применительно к каждому типу детали и узла и учета особенностей зрительных ощущений, восприятия и взаимодействия оператора-дефектоскописта с органами управления ультразвуковым прибором, пьезоэлектрическим преобразователем (ПЭП), электроннолучевой трубкой (ЭЛТ) и бумажного документа.

Поскольку работа дефектоскописта-оператора связана со зрительно-напряженной работой и наблюдением за экраном ЭЛТ, он должен один раз в год проходить осмотр в лечебно-профилактическом учреждении с участием офтальмолога с целью определения остроты зрения, аномалий в рефракции, объема аккомодации и т.п.. Ниже перечислены медицинские противопоказания для выполнения вышеуказанных работ.

1. Острота зрения не менее $0,5 D$ на одном глазу и $0,2 D$ на другом глазу при предварительном профосмотре; не менее $0,4 D$ на одном глазу и $0,2 D$ на другом

глазу при повторных периодических осмотрах.

2. Аномалии рефракции: миопия не более $8,0 D$, гиперметропия не более $8,0 D$, астигматизм не более $3,0 D$ при предварительном медосмотре; миопия не более $8,0 D$, астигматизм не более $4,0 D$ при повторном периодическом медосмотре.

3. Снижение аккомодации ниже возрастных норм.

4. Нарушение цветоощущения, если цвет несет информационную нагрузку.

5. Лагофталм (несмыкание век).

6. Хронические воспалительные или аллергические защитного аппарата и оболочек глазного яблока.

7. Заболевание зрительного нерва, сетчатки.

8. Нарастающий офтальмотонус.

9. Глаукома.

Требования к освещению для визуального восприятия дефектоскопистом-оператором информации с трех разных носителей – с экрана ЭЛТ, объекта контроля и бумажного документа – различаются. Слишком низкий уровень освещенности ухудшает восприятие информации с объекта контроля и при чтении документов, а слишком высокий приводит к уменьшению контраста графического образа на экране.

Когда по характеру работы требуется комбинация этих трех носителей информации, освещенность можно варьировать от 300 до 700 лк. Оптимальной считается освещенность рабочих помещений для работы видеотерминалами 300 ... 500 лк. Скачки яркости при смене полей зрения должны быть минимальными, т.е. интенсивность освещения объектов контроля, поверхностей, где находятся рукописи и документы, не должны превышать яркости экрана ЭЛТ.

Располагать рабочие места операторов ультразвукового контроля необходимо таким образом, чтобы в поле зрения оператора не попадали окна или осветительные приборы; они не должны находиться и непосредственно за спиной оператора.

Следует добиваться уменьшения отражений на экране от различных источников искусственного и дневного света. Желательно выбирать светильники с рассеивателями, а все блестящие детали осветительного оборудования, могущие попасть в поле зрения, должны быть заменены на матовые. Соотношение яркости экрана и непосредственного ближайшего окружения не должно превышать 3:1.

Резкие запахи от ремонтируемого оборудования, высокая температура воздуха и шум неблагоприятны для человека, особенно при длительном воздействии. У оператора это выражается в снижении работоспособности, в ускорении развития зрительного утомления, изменения цветоощущения, повышении расхода энергии. На рис. 14.1 показаны примеры неправильной организации рабочих мест дефектоскопистов ультразвукового контроля в помещениях ремонтного предприятия [7]. Изображения, формируемые на экране ЭЛТ (дисплее) при ультразвуковом контроле, классифицируются в зависимости от способов его получения и представления.

А – сканирование, при котором графический образ на экране формируется при неподвижном ПЭП (рис. 14.2, а).

В – сканирование – формирование акустической информации в виде точек различной яркости из сигналов ПЭП при его перемещении по прямой по поверхности объекта-контроля (рис. 14.2, б).

С – сканирование, при котором телевизионный растр на экране формируется из сигналов ПЭП при его перемещении на поверхности объекта контроля так, чтобы его след на этой поверхности образовывал растр (рис. 14.2, в). Таким образом, информация о дефектах объектов контроля может отображаться на экранах ультразвуковых дефектоскопов как в виде графических образов, так и в виде пятен различной формы.

В настоящее время достаточно широко развиты в ультразвуковом контроле такие методы формирования изображений, как вычислительная томография и когерентная обработка сигналов.

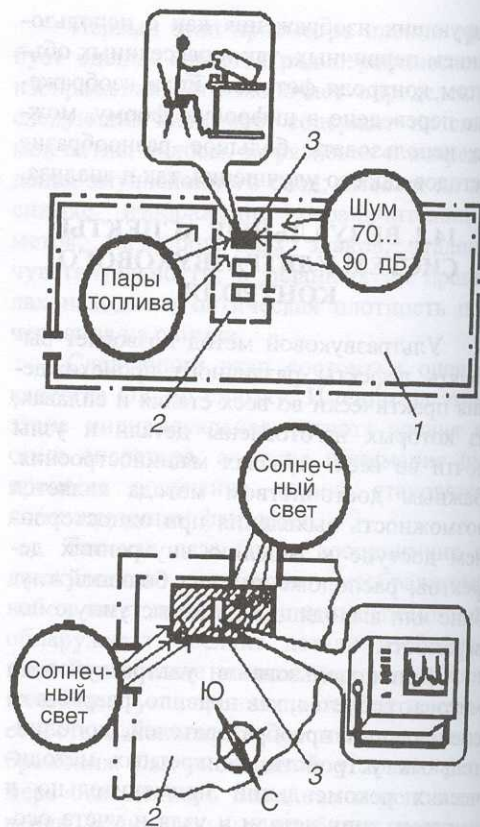


Рис. 14.1. Примеры неправильного расположения рабочих мест дефектоскопистов при контроле деталей ультразвуковым методом на авиаремонтных предприятиях:

1 – цех ремонта двигателей; 2 – "участок контроля"; 3 – рабочее место дефектоскописта

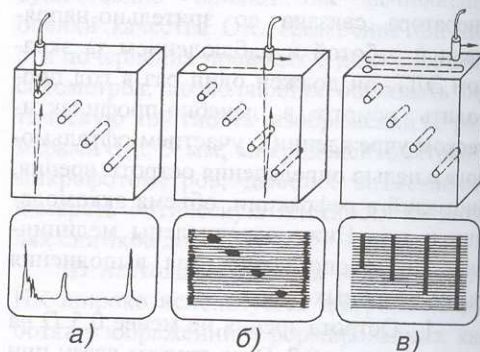


Рис. 14.2. Виды сканирований и изображений

Методы вычислительной томографии позволяют отображать в томографическом изображении локальные значения скоростей и ослаблений ультразвука. Из-за сложностей в аппаратурной реализации этих методов они не получили распространения в неразрушающем контроле.

Наибольшее практическое развитие получили когерентные способы визуализации с цифровой обработкой данных [3]. Следует отметить, что в акустике длина волны (\sim) обычно больше шероховатостей поверхности дефекта, и, следовательно, такие поверхности дают почти зеркальные рассеянные волны, которые обычно не попадают на излучатель-приемник после отражения. В результате изображение дефекта, например, в виде трещины, разбивается на несколько фрагментов (края, резкие изломы, трещины).

Одно из достоинств когерентных методов визуализации – значительное снижение требований к акустическому контакту. При плохом контакте происходит зашумленность изображения, но не смещение.

14.3. ВИЗУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ КАПИЛЛЯРНОГО КОНТРОЛЯ

Капиллярные методы основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователей.

Они эффективны только в тех случаях, когда несплошности материала имеют свободные полости, выходящие на поверхность объектов контроля, и когда глубина дефектов значительно превышает ширину их раскрытия.

Основные капиллярные методы контроля классифицируют:

– в зависимости от способа получения первичной информации на: яркостной

(ахроматический), цветовой (хроматический), люминесцентный, люминесцентно-цветовой.

Чувствительность капиллярных методов позволяет выявлять трещины с шириной раскрытия у выхода на поверхность более 1 мкм, глубиной более 10 мкм и протяженностью более 100 мкм. Параметр шероховатости поверхности Rz объектов в пределах 10 ... 20. Методы неэффективны для контроля объектов с грубой поверхностью и неприменимы для контроля пористых материалов. При проведении капиллярного контроля визуальные способы используют для:

- 1) сравнения чувствительности целевых наборов дефектоскопических материалов (индикаторных пенетрантов, очистителей объектов контроля от пенетранта, гасителей пенетранта, проявителей пенетранта);
- 2) обнаружения дефектов объектов контроля;
- 3) проверки частоты дефектоскопических материалов.

Чувствительность целевых наборов дефектоскопических материалов определяют на имеющих дефекты стандартных образцах предприятий. Следует следить за качеством дефектоскопических материалов и за чистотой емкостей, в которых их готовят. Так, например, загрязнение люминесцентным пенетрантом проявителя может приводить к ложным индикациям.

Геометрические и оптические данные индикаторных рисунков указывают не только на наличие дефектов, их местоположение, форму и протяженность на поверхности объекта контроля, но и коррелируют с некоторыми характеристиками дефектов, например, яркость пенетранта с глубиной дефекта; непрерывное, линейное расположение индикаторного следа говорит о наличии трещины, случайные небольшие пятна свидетельствуют о наличии пор.

При контроле цветovým или ахроматическим методом капиллярной дефекто-

скопии с визуальным способом выявления индикаторных рисунков применяют комбинированное освещение (общее и местное).

Комбинированную освещенность обработанной проявителем контролируемой поверхности в зависимости от ее особенностей выбирают в пределах 750 ... 4000 лк при применении люминесцентных источников света, или 500 ... 3000 лк при использовании ламп накаливания.

Ультрафиолетовая облученность при использовании люминесцентных методов должна составлять 500 ... 3000 мкВт/см². Участок визуального контроля в ультрафиолетовом излучении должен быть оснащен светильниками отраженного или рассеянного светораспределения, обеспечивающими освещенность 10 лк по помещению. Прямая подсветка зоны контроля и глаз оператора от источников видимого света не допускается. На контролируемой поверхности допускается освещенность от ультрафиолетового облучателя не более 30 лк.

При выполнении люминесцентного контроля глаза оператора должны быть адаптированы к темноте. Нельзя носить чувствительные к ультрафиолетовому излучению очки.

При выполнении яркостного способа контроля в некоторых случаях лучше использовать источники, в которых мало спектральных составляющих, отражаемых индикаторным рисунком, и много других составляющих видимого света. Когда такой свет освещает белый фон поверхности контролируемого объекта, то индикаторный рисунок выглядит темнее и достигается максимальный контраст рисунка.

В некоторых случаях для обнаружения следа дефекта и расшифровки результатов контроля применяют различные средства осмотра (лупы, бинокулярные стереоскопические микроскопы, зеркала и т.п.) в условиях контроля, соответствующих правилам эксплуатации этих средств.

При проведении капиллярного контроля очень часто используют различные

средства и методы оптического неразрушающего контроля, например, лазер с бегущим пучком излучения. Когда пучок лазера попадает на люминесцентный перетрант индикаторного рисунка, то последний генерирует излучение в другой части спектра. Фотодетектор может преобразовать импульсы света в электрические сигналы, которые могут анализироваться методами распознавания образов с целью определения формы и размера индикаторного рисунка.

14.4. ВИЗУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ МАГНИТОПОРОШКОВОГО КОНТРОЛЯ

Магнитопорошковый метод неразрушающего контроля основан на явлении притяжения частиц магнитного порошка магнитными потоками рассеяния, возникающими над дефектами в намагниченных объектах контроля.

Наличие и протяженность индикаторных рисунков в виде полосок или валиков, вызванных полями рассеяния дефектов, можно регистрировать визуально, с помощью оптических устройств (луп, бинокулярных стереоскопических микроскопов, зеркал, эндоскопов и т.п.), а также с использованием автоматизированных систем обработки изображений.

Метод предназначен для выявления поверхностных и подповерхностных нарушений сплошности: волосовин, трещин различного происхождения, непроваров сварных соединений, флокенов, закатов, надрывов и т.п. Его применяют для контроля объектов из ферромагнитных материалов с магнитными свойствами, позволяющими создавать в местах нарушения сплошности магнитные поля рассеяния, достаточные для притяжения частиц магнитного порошка. Метод может быть использован для контроля объектов с немагнитными покрытиями (толщиной менее 0,03 мм).

Чувствительность магнитопорошкового метода определяется магнитными

характеристиками объекта контроля, его формой, размерами и шероховатостью поверхности, напряженностью намагничивающего поля, местоположением и ориентацией дефектов, взаимным направлением намагничивающего поля и дефекта, свойствами дефектоскопического материала (порошков, суспензий, магнитогуммированных паст), способом его нанесения на объект контроля, а также способом и условиями регистрации индикаторного рисунка выявляемых дефектов.

Отечественным нормативным документом [21] установлены три условных уровня чувствительности, приведенные в табл. 14.1

Основные свойства магнитных порошков, влияющие на выявляемость дефектов: дисперсность, магнитные и оптические характеристики

Магнитный порошок может иметь различные цвета, а флюоресцирующий – различный цвет свечения. Обычно порошок имеет серый, красный, черный, желтый и синий пигменты и металлический блеск.

Качество готовых дефектоскопических материалов определяют перед проведением контроля на стандартных образцах предприятий, имеющих дефекты, аттестованных в установленном порядке.

Иногда при использовании магнитопорошкового метода на поверхность контролируемого объекта наносится тонкий слой белого лака, чтобы сделать более видимыми черные частицы порошка (мелкие частицы более чувствительны к магнитному полю и добавление пигмента к частицам уменьшает их чувствительность к полям рассеяния). Следует учитывать то, что при толщине покрытия объекта контроля более 30 мкм порошок осаждается в виде размытой неплотной полосы, а не в виде валика, так как часть поля рассеяния находится в слое покрытия.

Нормативные документы на проведение магнитопорошкового контроля устанавливают минимальные уровни освещенности (облученности) контролируемой поверхности объектов.

Так, например, ГОСТ 21105-87 (в ред. 1990 г.) и военный стандарт MIL-STD-1949A (США) при использовании магнитных порошков естественной окраски, а также цветных магнитных порошков устанавливают значение минимальной освещенности в 1000 лк, а при использовании люминесцентных магнитных порошков – минимальный уровень облученности ультрафиолетовым излучением соответственно 2000 мкВт/см² и 1000 мкВт/см², при минимально допустимой освещенности поверхности 20 лк.

14.1. Уровни чувствительности магнитопорошкового метода контроля

Условный уровень чувствительности	Минимальная ширина раскрытия условного дефекта, мкм	Минимальная протяженность условного дефекта, мм
А	2,0	0,5
Б	10,0	
В	25,0	

Примечания:

1. Условный уровень чувствительности А достигается при параметре шероховатости контролируемой поверхности $Ra \leq 2,5$ мкм, уровни чувствительности Б и В – при $Ra \leq 10$ мкм.
2. При появлении подповерхностных дефектов, а также при $Ra > 10$ мкм чувствительность метода понижается и условный уровень чувствительности не нормируется.
3. При контроле изделий с немагнитными покрытиями с увеличением толщины покрытия чувствительность метода понижается.

К проведению магнитопорошкового контроля должны допускаться только хорошо обученные дефектоскописты, так как при контроле на поверхности объектов контроля могут возникать ложные индикации.

Дефектоскописты должны знать признаки индикаторных рисунков реальных дефектов и уметь распознавать ложные индикации.

14.5. ВИЗУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ ТЕЧЕЙСКОГО КОНТРОЛЯ

Ниже дается ряд терминов и определений, относящихся к контролю качества изделий проникающими веществами.

Течейскание – это вид испытаний на герметичность, основанный на регистрации веществ, проникающих через течи.

Герметичность – это свойство конструкций препятствовать проникновению через них веществ.

Течь – канал или пористый участок в конструкции, нарушающий ее герметичность.

Поток газа – это его количество, протекающее через канал-течь ($\text{м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с} = \text{Вт}$).

При испытаниях на герметичность используют пробные и индикаторные вещества.

Основные информационные функции выполняет пробное вещество, проникновение которого через течь обнаруживается в процессе контроля. При испытании конструкций, например, химическим методом, часто используют индикаторное вещество, которое в результате взаимодействия с пробным веществом способствует формированию визуального сигнала о наличии течи.

Известны несколько модификаций этого метода: нанесение на объекты индикаторной массы; применение индикатор-

ных лент; применение индикаторной краски; использование высоковольтного разряда в контрольной камере.

В качестве индикаторных масс могут использоваться различные сочетания химических веществ, обладающих высокой чувствительностью к пробному газу, например, к двуокиси углерода. При наличии течей пробный газ, взаимодействуя с индикаторной массой, вызывает появление пятен различного цвета (желтого, синего и др.).

Индикаторные ленты обычно изготавливают из пропитанных индикаторным веществом хлопчатобумажных тканей. В качестве таких веществ может быть смесь, например, этилового спирта, глицерина, бромфенола синего и раствор сернокислого аммония.

Принцип контроля герметичности конструкций с применением индикаторных лент заключается в наклеивании последних на предполагаемые места течи и наблюдении за образованием пятен при взаимодействии индикатора с пробным газом. Чувствительность способа индикаторных лент составляет $1 \cdot 10^{-7} \dots 7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

При использовании способа индикаторной краски в последнюю, которая служит лакокрасочным покрытием, добавляют специальный индикатор, например, бромфеноловый синий, реагирующий на рабочую среду. В местах утечек рабочая среда вступает в химическую реакцию с индикатором и в результате на краске образуются синие пятна, указывающие на место течи. Чувствительность этого способа достигает $1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па}/\text{с}$.

В методе высоковольтного разряда используется индукционная катушка, создающая видимый разряд в камерах с давлением $1 \dots 1000 \text{ Па}$. Пробным газом может быть, например, двуокись углерода или пар быстроиспаряющейся жидкости

(бензин, ацетон и т.п.). Когда пробный газ вытекает из сосуда и входит в камеру, то цвет разряда изменяется. Например, с пурпурового (цвет воздуха) на цвет, характерный для пробного газа.

14.6. ВИЗУАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМ РАДИОВОЛНОВОГО КОНТРОЛЯ

При проведении радиоволнового неразрушающего контроля обычно используются приборы и устройства, работающие в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ), именуемом в зарубежной литературе как микроволновой (microwave) диапазон.

Диапазон длин волн, преимущественно используемый в радиоволновом контроле, ограничен 1 ... 100 мм. Более освоены и обеспечены измерительной аппаратурой 8 мм и 30 мм поддиапазоны.

Результаты радиоволнового неразрушающего контроля, впрочем как и всех видов НК, могут быть записаны и представлены визуально. При этом уровень освещенности, размеры поля индикации, углы наблюдения, цветовая контрастность также важны, как и параметры других важнейших узлов радиоволновых приборов.

Визуальные методы широко используются при работе с приборами радиоволнового вида НК, а в ряде случаев они являются принципиально необходимыми. Речь идет, в первую очередь, об СВЧ томографии, радиографии, контроле динамических процессов и технической проверке и оптимизации радиоволновых методов.

Для визуализации результатов в этих случаях используются современные компьютерные дисплеи, элементы телевизионной техники, двухкоординатные и обычные самописцы, осциллоскопы, ос-

циллографы, фотопленка, термобумага и многое другое.

Регистрация результатов НК с получением радиоизображений и их последующим анализом чаще всего дает положительные результаты, особенно при выявлении технологической и текстурной анизотропии, внутренних остаточных напряжений и деформаций, зон неомогенности и структурных неоднородностей.

Более сложные системы визуализации с применением визуальных методов анализа радиоизображений связаны с использованием радиоголографии и радиоинтерференции в СВЧ диапазоне волн. В дальнейшем, после получения и регистрации радиоголограмм часто производят оптическое восстановление изображения. Например, созданные жидкопленочные преобразователи производят трансформацию интерференционной картины СВЧ поля в тепловую, затем в картину изменений показателя преломления и далее, после освещения плоскопараллельным пучком лазерного излучения, в визуальную картину исследуемого СВЧ поля.

Одним из современных способов визуализации СВЧ полей и радиоголограмм является способ применения фотоуправляемых полупроводниковых пластин (ФУПП), в котором сочетаются СВЧ и оптические методы обработки. Световой луч, падая на пластину, повышает концентрацию свободных электронов в зоне светового пятна, в результате чего пятно становится хорошим отражателем (реактивным зондом). Световое пятно можно быстро сканировать известными оптическими средствами (например, барабаном Вейлера) на большой площади исследуемого пространства. Регулируя размеры пятна, можно быстро менять разрешающую способность и производить поляризационный анализ структуры СВЧ полей, а следова-

тельно и различных ОК. Указанный оптический способ регистрации не зависит от длины волны используемого СВЧ излучения.

Существует возможность получения цветного изображения макроструктуры неоднородностей и дефектов диэлектрического материала. Для этого изменяющийся по величине информативный сигнал управляет частотой цветоформирующего телевизионного сигнала, в результате чего на экране телевизионного монитора получают достаточно наглядное цветное изображение структуры. Обычной калибровкой можно "привязать" выбранный цвет к состоянию ОК: например, зеленый цвет – хорошо, желтый – допусти-

мо, красный – дефект. Это пример упрощения анализа информации без потери ее качества.

Нередко в практике радиоволнового контроля используются такие визуальные средства регистрации как самопишущие приборы. Причем, если речь идет о наглядной регистрации параметров динамического процесса, то запись производится в реальном масштабе времени. Такими процессами, контролируруемыми с помощью радиоволн СВЧ диапазона, являются процессы отверждения, сушки, вулканизации, пропитки и многие другие. В этих процессах происходят химические и физические изменения, проявляющиеся в изменениях не только плотности, но и диэлектрической проницаемости.

Глава 15

МЕЖДУНАРОДНЫЕ И ЕВРОПЕЙСКИЕ СТАНДАРТЫ В ВИЗУАЛЬНОМ КОНТРОЛЕ

На рис. 15.1 представлена схема взаимосвязанных базовых евростандартов по визуальному контролю сварных конструкций из металлических материалов.

Стандарт EN 25817-92 (см. рис. 15.1) создан на базе международного стандарта ISO 5817-92 "Соединения стальные, выполненные дуговой сваркой – руководство по оценкам уровней качества по дефектоскопии" и предназначен для использования в качестве справочного материала при проведении неразрушаю-

щего контроля (НК). Три уровня качества сварных соединений, обозначенные как *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 различным видам сварных соединений, а не к законченным изделиям или компонентам.

Уровни приемки

Методология
Уровни контроля

Согласование между
уровнями качества и
уровнями оценки
индикаций

Уровни качества,
основанные на
реальных размерах
дефектов

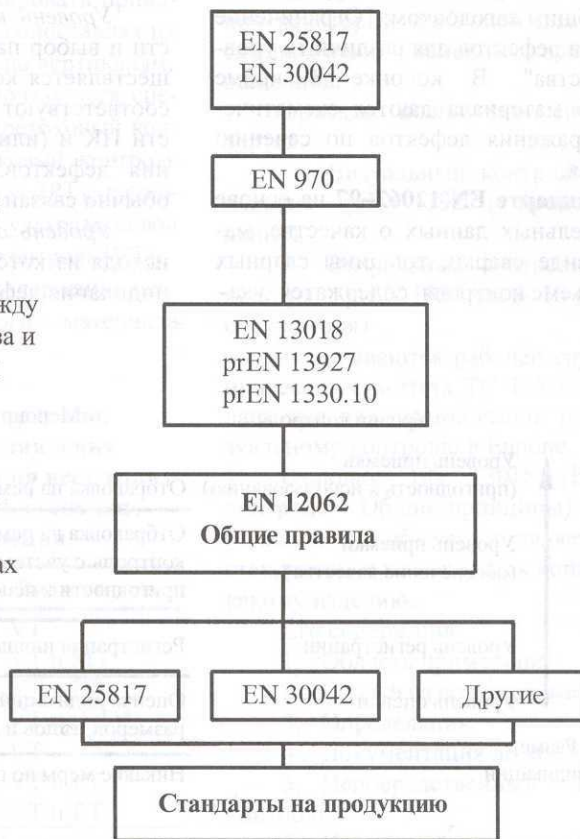


Рис. 15.1. Схема взаимосвязанных стандартов

Следовательно, возможно применение различных уровней качества к отдельным сварным соединениям в одном и том же изделии или компоненте.

Этот стандарт определяет критерии уровней качества стальных сварных соединений в диапазоне толщин 3 ... 63 мм, но он может быть легко применен и к более толстым сварным соединениям при условии учета технических факторов, влияющих на качество сварных соединений.

Основное содержание стандарта представлено в виде таблицы, которая имеет шесть вертикальных колонок, снабженных заголовками: 1 (боковик) – название дефектов; 2 – обозначение дефектов по ISO-6520; 3 – примечание; 4, 5, 6 – соответственно требования по уровням *D*, *C* и *B* с общим заголовком: "Ограничение параметров дефектов для различных уровней качества". В колонке 3 кроме текстового материала даются схематические изображения дефектов по сечению соединения.

В стандарте EN 12062–97 на основе предварительных данных о качестве, материале, виде сварки, толщины сварных швов и объеме контроля содержатся ука-

зания по выбору вида НК и по оценке его результатов с точки зрения качества. Стандарт 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.

Однако указания стандарта относительно уровней приемки при НК скорректированы с уровнями качеств, определенными в стандартах EN 25817 и EN 30042 (низкий, средний, высокий), только в общем виде, а не конкретно для каждой индикации дефекта.

Ниже перечислены несколько терминов, которые используются в EN 12062.

Уровень контроля – степень точности и выбор параметров, по которым осуществляется контроль. Различные уровни соответствуют различной чувствительности НК и (или) возможностям обнаружения дефектов. Выбор уровня контроля обычно связан с требованиями к качеству.

Уровень оценки – уровень контроля, исходя из которого должна быть оценена индикация дефекта (рис. 15.2).

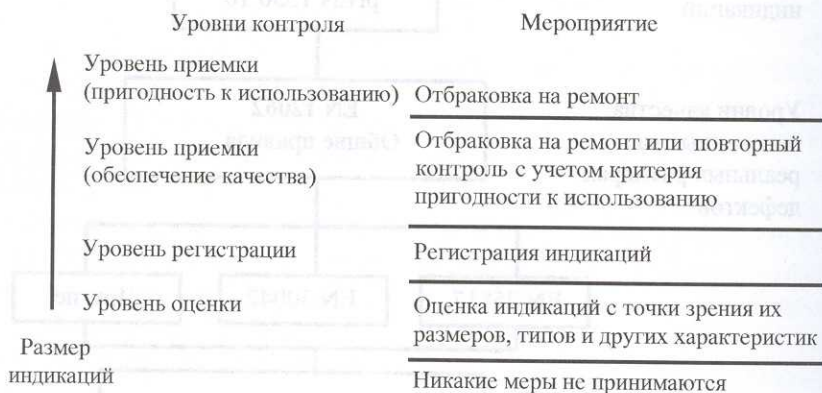


Рис. 15.2. Классификация индикаций дефектов

Уровень регистрации – уровень контроля, исходя из которого индикация должна быть зарегистрирована (рис. 15.2).

Уровень приемки – уровень контроля, нижняя граница которого связана с допустимыми в ОК несплошностями, изъянами и т.п. (рис. 15.2).

Индикация – изображение или сигнал о 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 их реальных размеров.

Основной материал стандарта представлен в виде системы таблиц. Благодаря такому построению этих норм специалисту легче изучать и анализировать приводимые в таблицах данные, сопоставляя их как по горизонталям, так и по вертикалям.

В этом стандарте используются специальные сокращения: вихретоковый контроль (ЕТ); магнитопорошковый контроль (МТ); капиллярный контроль (РТ); радиографический контроль (РТ); ультразвуковой контроль (УТ); визуальный контроль (ВТ).

Ниже дано основное содержание указанного выше табличного материала (табл. 15.1).

15.1. Виды НК, как правило, используемые для выявления поверхностных дефектов на всех типах сварных конструкций, включая условные соединения

Материалы	Вид контроля
Ферромагнитная сталь	ВТ ВТ и МТ ВТ и РТ ВТ и (ЕТ)*
Аустенитная сталь, алюминий, никель, медь и титан	ВТ ВТ и РТ ВТ и ЕТ

*Этот вид НК применим с некоторыми ограничениями.

Стандарт EN 970 относится к визуальному контролю сварных соединений, полученных сваркой плавлением металлических материалов.

EN 970 требует, чтобы освещенность контролируемой поверхности была не менее 350 люкс, рекомендуемая освещенность – 500 люкс. Подлежащая контролю поверхность должна рассматриваться под углом более чем 30° к плоскости этой поверхности и с расстояния до 600 мм.

По этому стандарту визуальный контроль может выполняться:

- при подготовке к сварке;
- во время сварки;
- на готовом сварном соединении;
- на отремонтированном сварном соединении.

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

Проекты новых европейских стандартов:

- Визуальный контроль – Оборудование – prEN 13927 (в процессе обсуждения);
- Визуальный контроль – Терминология – prEN 1330 часть 10 (в процессе обсуждения)
- разрабатываются рабочей группой Технического комитета TC 138 CEN и предлагаются для гармонизации работ по визуальному контролю в Европе.

Стандарт EN 13018 (Визуальный контроль – Общие принципы) достаточно большой по объему и является общим стандартом и не относится конкретно ни к какому изделию.

Его содержание:

1. Область применения.
2. Ссылки на нормативные документы.
3. Определения.
4. Документация до контроля.
5. Непосредственный визуальный контроль.
6. Косвенный визуальный контроль.
7. Персонал.

8. Оценка.

9. Документация после контроля.

Из-за разнообразия различных определений визуального контроля в Европе было очень трудно установить понятную всем классификацию, объясняющую основные методы, используемые в визуальном контроле. Для упрощения были установлены два определения для различения *непосредственного* (прямого) и *косвенного* (непрямого) визуального контроля.

Непосредственный визуальный контроль – это контроль, при котором имеется беспрепятственный оптический путь от контролируемой области к глазу наблюдателя. Контроль выполняется либо невооруженным глазом, либо с помощью, например, 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 т.п.

Раздел 4 стандарта касается составления обязательных письменных инструкций на контроль, а если требуется по стандарту на изделие или по контракту, то и использование письменных процедур.

Письменные инструкции или процедура должны, как минимум, содержать следующую информацию:

- Наименование контролируемого объекта, его размещение и перечисление по возможности большого количества деталей.

- Объем контроля.

- Метод и последовательность проведения контроля.

- Состояние поверхности.

- Подготовка поверхности.

- Требования к персоналу.

- Критерии приемки.

- Освещение (тип, уровень и направление).

- Оборудование визуального контроля, которое должно использоваться.

- Документация после контроля, которая будет использоваться.

Персонал, выполняющий контроль, должен соответствовать стандарту EN 473 при условии проведения проверки дальнего зрения в соответствии с ISO 8596 – Офтальмологическая оптика – Проверка остроты зрения – Стандартный оптотип и его представление для остроты зрения 0,63.

Острота зрения степени 0,63 определяется кольцом Ландольта, наружный диаметр d которого стягивает угол в $8'$, и ширина которого, а также разрыв в нем стягивают угол в $1,6'$ на определенном расстоянии наблюдения.

Стандарт EN 12454-98 – Литье – Визуальный контроль поверхностных несплошностей – Стальные отливки в песчаную форму.

В стандарте отмечается, что при контроле отливок следует учитывать два фактора:

- шероховатость поверхности;

- поверхностные несплошности.

Стандарт EN 1370 рассматривает контроль шероховатости поверхности.

Оценка отливок контролером поверхности производится методом ее визуального сравнения с набором образцов¹, содержащих отпечатки реальных несплошностей.

Рассматриваемый стандарт определяет несколько типов несплошностей и уровней важности для каждого типа.

Выбранные компоненты образцов для сравнения и количество уровней важности таковы:

- поверхностные включения: неметаллический материал, захваченный на поверхности отливки (4 уровня важности);

- газовая пористость: индикации газа на поверхности отливки (4 уровня важности);

¹ Набор SCRATA образцов для сравнения содержит отпечатки в виде плат (150 × 100 мм каждая) и соответствующие фотографии.

– закаты и холодные спаи: поверхностные неровности, имеющие вид складок (4 уровня важности);

– рванины: слегка приподнятые поверхностные неровности (2 уровня важности);

– включения: индикации жеребеек или внутренних отбелов (2 уровня важности);

– сварные швы: индикации сварных швов без обработки, полностью или частично удаленные зачисткой (4 уровня важности).

В табл. 15.2. дано соответствие между уровнями важности в данном стандарте и выбранными образцами для сравнения.

Уровень важности несплошностей, которые должны быть выявлены визуально, сильно зависит от шероховатости поверхности, на которой они появляются.

Для оценки поверхностей отливки контролируемые области должны визуально сравниваться без вспомогательных оптических средств с соответствующими образцами для сравнения по категории и уровню важности.

Сравнение поверхности отливки с образцом для сравнения должно производиться при расположении образца для сравнения рядом с отливкой при хороших

условиях освещения, например, минимум 300 люкс.

Контроль должен выполняться обученным персоналом с удовлетворительной остротой зрения.

Если в любой контролируемой области имеются две или более несплошности, то каждая несплошность должна быть оценена в соответствии с ее уравнием важности.

Оценка считается удовлетворительной, если на требуемой области она равна или лучше, чем оценка данного эталонного образца для сравнения.

По требованию покупателя изготовитель обязан вести запись результатов контроля и представить отчет.

Обозначение отливки должно позволять идентифицировать изделие с соответствующим документом контроля.

Записи, подшитые изготовителем при контроле, должны содержать, по меньшей мере, следующее:

– идентификацию отливки;

– имя и квалификацию лица, выполнявшего контроль;

– выявленную категорию несплошности и установленный уровень важности для каждой проконтролированной области.

15.2. Соотношение между уровнями важности и выбранными несплошностями

Несплошности	Уровни важности			
	1	2	3	4
	Идентификация в соответствии с набором SCRATA			
Поверхностные включения	B1	B2	B4	B5
Газовая пористость	C2	C1	C3	C4
Закаты и холодные спаи	D1	D1	D2	D5
Рванины	–	–	E3	E5
Включения	–	–	F1	F3
Сварные швы	J1	J2	J3	J5

Примечание. Требуемый уровень важности может быть различным для каждой категории.

ICNDT

"Международная организация
неразрушающего контроля"

Международный комитет по неразрушающему контролю

**РАБОЧАЯ ГРУППА
КООРДИНАЦИЯ РАБОТЫ ПО ОБУЧЕНИЮ И
КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ**

Рекомендации ICNDT WH 24-00

**Требования к техническим знаниям персонала
неразрушающего контроля
(Минимальные требования)**

Визуальный контроль (VT)

Документ подготовлен Немецким обществом
неразрушающего контроля (DGZfP), сентябрь 1999.
Принят ICNDT. Октябрь 2000

**1. Требования к продолжительности подготовки (обучения)
персонала неразрушающего контроля**

Часть		Уровень I, %	Уровень II, %	Уровень III, %
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	

Предлагаемая длительность подготовки (ч) в соответствии с требованиями:

EN 473	16	24	
--------	----	----	--

2. Программа подготовки

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к програм- мам уровней I и II)
1. ОСНОВЫ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ		
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. СПОСОБЫ КОНТРОЛЯ		
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; – 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 табл. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к програм- мам уровней I и II)
2.5. Эндоскоп. Дистан- ционный визуальный контроль. Общие сведен- ния	2.5. Эндоскопы. 2.5.1. Жесткие эндоско- пы (бороскопы). 2.5.2. Гибкие эндоскопы (волоконные эндоскопы). 2.5.3. Видеоскопы. Видео- технология. Выбор обо- рудования. Выполнение контроля. Методы оцен- ки размера дефектов	2.5. Указания о выборе оборудования контроля, процедур, проверках, от- четах и используемой документации
3. ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТРОЛЯ И ОБЛАСТЬ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ		
3.1. Обычный визуаль- ный контроль: проверка общих условий. Перво- начальные сведения о контролируемом изде- лии, например, его иден- тификация, установка	3.1. Составление соот- ветствующих характери- стик контроля и созда- ние процедур для выяв- ления дефектов	3.1. Оценка важности признаков выявляемых дефектов
3.2. Специальный визу- альный контроль: кон- троль специальных па- раметров, требующий по- вышенного уровня осве- щенности и особого обо- рудования, например, отклонений формы, тек- стуры поверхности, де- фекты	3.2. Описание контроли- руемых параметров, ус- ловий контроля для их выявления, классифика- ция, оценка и докумен- тирование	3.2. Значение контроли- руемых параметров и суждение о них с учетом пригодности изделия для выполнения задач, для которых оно предназна- чено
4. ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЯ		
Возможные изделия: от- ливки, изделия, обрабо- танные давлением, валь- цованные изделия, тубы	Определение длительно- сти и объема контроля	Углубленные знания применяемых материа- лов и системы управле- ния качеством
4.1. Технология изготов- ления и материалы. Де- фекты, их вид, места, где они встречаются	4.1. Углубленные знания контролируемых изде- лий. Распознавание ин- дикаций. Составление проектов каталогов и дефектов	4.1. Знания и опыт рабо- ты с материалами и из- делиями
4.2. Выполнения контро- ля по инструкции	4.2. Составление инст- рукций по контролю в соответствии с приме- няемыми стандартами	4.2. Подготовка пись- менных процедур, опи- сание способов контроля и условий контроля

Окончание табл. 2

Уровень I	Уровень II (дополнительно к программе уровня I)	Уровень III (дополнительно к програм- мам уровней I и II)
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
5. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЙ ВИЗУАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ		
	Возможные отрасли промышленности: нефтехимические и промышленные предприятия, турбины, авиация, железные дороги	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
6. СТАНДАРТЫ		
Инструкции по контролю. Процедуры неразрушающего 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
7. ДРУГИЕ СПОСОБЫ И МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ		
	Методы контроля поверхностей	Технология машинного зрения. Термография. Обработка изображения. Анализ поломок
8. БЕЗОПАСНОСТЬ И ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. КВАЛИФИКАЦИЯ И АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ		
	Безопасность и защита окружающей среды	Обучение, аттестация

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Машиностроение:** Энциклопедия: В 40 т. Т. IV-3: Надежность машин / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1998. 552 с.
2. **Машиностроение:** Энциклопедия: В 40 т. Т. III-7: Измерения, контроль, испытания и диагностика / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 464 с.
3. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др.; Под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995. 488 с.
4. **Измерения** в промышленности: Справочник: В 3 кн. Кн. 1: Теоретические основы: Пер. с нем. / Под ред. П. Профоса. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1990. 492 с.
5. **Теория** оптических систем: Учеб. для вузов / Б.Н. Бегунов, И.П. Заказов, С.И. Кирюшин, В.И. Кузичев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 432 с.
6. **Справочная** книга по светотехнике / Под ред. Ю.Б. Айзенберга. М.: Энергоатомиздат, 1983. 472 с.
7. **Диагностика** авиационных деталей / В.Н. Лозовский, Г.В. Бондал, А.О. Каксис, А.Е. Колтунов. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
8. **Автоматизация** визуального технологического контроля в электронном машиностроении. М.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 287 с.
9. **СНиП 23-05-95.** Естественное и искусственное освещение / Минстрой России ГП ЦПП, 1995. 35 с.
10. **ГОСТ 23479-79.** Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования.
11. **РД 03-606-03.** Инструкция по визуальному и измерительному контролю / Минтоп России, 2004. 101 с.
12. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов / Госгортехнадзор России, НПО ОБТ. М., 1997.
13. **Бауэр Ф.Л., Гооз Г.** Информатика. Вводный курс: В 2 ч.: Ч 1: Пер. с нем. М.: Мир, 1990. 336 с.
14. **Демирчоглян Г. Г.** Как сохранить и улучшить зрение. Харьков.: Сталкер, 1997. 320 с.
15. **Зрение** без очков: Пер. с англ. / Сост. В.В. Шарпило. Мн.: Парадокс, 1997. 416 с.
16. **Сварка** и свариваемые материалы: Справ. изд. В 3 т.: Т. I: Свариваемость материалов / Под. ред. Э.Л. Макарова. М.: Металлургия, 1991. 528 с.
17. **Макаров Э.Л.** Холодные трещины при сварке легированных сталей. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.
18. **Цветное** литье: Справочник / Н.М. Галдин, Д.Ф. Чернега, Д.Ф. Иванчук и др.; Под общ. ред. Н.М. Галдина. М.: Машиностроение, 1989. 528 с.
19. **Контроль** качества отливок: Учеб. пособие / В.М. Воздвиженский, А.А. Жуков, В.К. Батраков. М.: Машиностроение, 1990. 184 с.
20. **Фомин Г.С.** Коррозия и защита от коррозии: Энциклопедия международных стандартов. М.: Изд-во стандартов, 1994. 443 с.
21. **ГОСТ 21105-87.** Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.