

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗДЕЛИЙ
И СИСТЕМ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь
по образованию в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2011

УДК 615.47:681.7(075.8)

ББК 34.7я7

П 80

А в т о р ы:

*М.Г. Киселев, В.Л. Габец,
А.В. Дроздов, Д.А. Степаненко*

Р е ц е н з е н т ы:

А.Н. Осипов, И.Л. Баршай

П 80 Производство оптических деталей, изделий и систем медицинского назначения: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» / М.Г. Киселев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2011. – 123 с.

ISBN 978-985-525-548-3.

Учебно-методическое пособие содержит основные сведения о производстве оптических деталей, изделий и систем медицинского назначения. Достаточно подробно рассмотрены вопросы технологии изготовления корригирующих очковых линз и очковых оправ. Приведены технологические операции изготовления контактных и интраокулярных линз, а также элементов волоконной оптики, применяемых в медицинских эндоскопах. Рассмотрены способы и технологии получения покрытий на оптических деталях.

Пособие предназначено для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» при изучении ими учебной дисциплины «Технология производства изделий медицинского назначения». Кроме того, оно может быть полезно студентам специальностей машино- и приборостроительного направления при изучении технологических дисциплин, в программах которых предусмотрено изучение процессов изготовления оптических деталей.

УДК 615.47:681.7(075.8)
ББК 34.7я7

ISBN 978-985-525-548-3

© БНТУ, 2011

ГЛАВА 1. ОПТИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ И ИЗДЕЛИЯ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ЗРЕНИЯ

1.1. Основные сведения о системе зрения человека и строении глаза

Орган зрения является сложной системой и приспособлен для восприятия света и извлечения из него информации о внешнем мире. Именуемый зрительным анализатором, он состоит из трех отделов: периферического, проводникового и центрального.

Периферический отдел образуют два глазных яблока, представляющие собой совокупность оптической и световоспринимающей систем. Оптическая система каждого глаза состоит из оптических сред, создающих изображение предметов внешнего мира на сетчатке; а также мышечных систем, одна из которых управляет движением глаз, другая, расположенная внутри глазного яблока, обеспечивает фокусировку изображения на сетчатке и регулирует освещенность на ней, изменяя размер зрачка. Световоспринимающей системой глаза является его сетчатая оболочка, содержащая светочувствительные клетки – зрительные рецепторы. Проводниковым отделом служат зрительные нервы, которые соединяют отдельными волокнами зрительные рецепторы с клетками затылочной части коры головного мозга, где расположено центральное звено зрительного анализатора, воспринимающее и анализирующее то, что видит глаз.

Наличие двух глаз позволяет сделать наше зрение стереоскопичным (т. е. позволяет формировать трехмерное изображение). Правая сторона сетчатки каждого глаза передает через зрительный нерв «правую часть» изображения в правую сторону головного мозга, аналогично действует левая сторона сетчатки. Затем две части изображения – правую и левую – головной мозг соединяет воедино.

Так как каждый глаз воспринимает «свою» картинку, при нарушении совместного движения правого и левого глаза может быть расстроено бинокулярное зрение.

Глазное яблоко человека (рис. 1.1) имеет форму, близкую к шаровидной, состоит из нескольких оболочек и размещается в особом полости пространства черепа – глазнице.

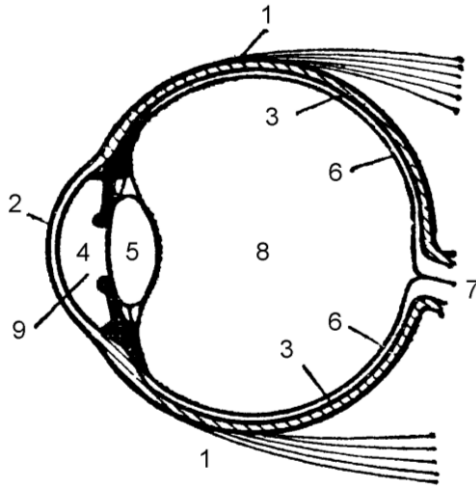


Рис. 1.1. Схематический разрез глаза человека:

- 1 – белковая оболочка; 2 – роговая оболочка; 3 – сосудистая оболочка; 4 – зрачок;
 5 – хрусталик; 6 – сетчатая оболочка; 7 – нерв; 8 – стекловидное тело;
 9 – передняя камера

С внутренней стороны к склере прилегает **сосудистая оболочка 3**, состоящая из сложного сплетения кровеносных сосудов, питающих глаз. Эта вторая оболочка в передней части глаза переходит в **радужную оболочку**, окрашенную у разных людей в различный цвет. Радужная оболочка имеет в середине отверстие, называемое **зрачком 4**. Радужная оболочка способна деформироваться и таким образом менять диаметр зрачка. Это изменение происходит рефлекторно (без участия сознания) в зависимости от количества света, попадающего в глаз: при ярком освещении диаметр зрачка равен 2 мм, при слабом освещении доходит до 8 мм.

На внутренней поверхности сосудистой оболочки расположена **сетчатая оболочка**, или **сетчатка 6**. Она покрывает все дно глаза, кроме его передней части. Сзади через оболочку входит **зрительный нерв 7**, соединяющий глаз с мозгом. Сетчатка состоит в основном из разветвлений волокон зрительного нерва и их окончаний и образует **светочувствительную поверхность глаза**.

Промежуток между роговой и радужной оболочками называется *передней камерой* 9 и заполнен *камерной влагой*. Внутри глаза, непосредственно за зрачком, расположен *хрусталик* 5, представляющий собой прозрачное упругое тело, имеющее форму двояковыпуклой линзы. Кривизна поверхностей хрусталика может меняться в результате действия облегающей его со всех сторон мышцы. Посредством изменения кривизны поверхностей хрусталика достигается приведение изображения предметов, лежащих на различных расстояниях, точно на поверхность чувствительного слоя сетчатки; этот процесс называется *аккомодацией*. Вся полость глаза за хрусталиком заполнена прозрачной студенистой жидкостью, образующей *стекловидное тело* 8.

1.2. Принцип коррекции недостатков глаза очковыми линзами

Для рассмотрения вопроса о коррекции недостатков зрения очковыми линзами необходимо знать параметры оптической системы глаза как в норме, так и при наличии отклонений от нее.

Для глаза различают дальнейшую и ближайшую точки ясного зрения и точку фиксации глаза (рис. 1.2).

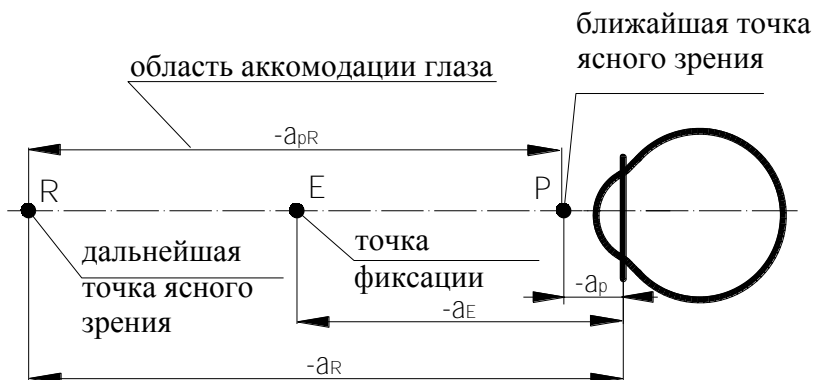


Рис. 1.2. Схема, поясняющая область аккомодации глаза

Дальнейшая точка ясного зрения R — это наиболее далекая точка в пространстве предметов, резкое изображение которой полу-

чается на сетчатке глаза при отсутствии напряжения аккомодации. **Ближайшая точка ясного зрения** P – это наиболее близкая точка в пространстве предметов, резкое изображение которой на сетчатке глаза получается при максимальном напряжении аккомодации. **Точка фиксации** E – это точка в пространстве предметов, на которую направлен взгляд наблюдателя. При этом расстояния от передней главной точки глаза до точек R , P и E обозначаются соответственно a_R , a_P , и a_E .

Расстояние между дальнейшей и ближайшей точками ясного зрения a_{PR} определяет **область аккомодации** глаза. В офтальмологической и очковой оптике широко применяется диоптрийная мера исчисления, служащая для измерения как линейных отрезков, так и оптических сил (рефракций) линз. Одна **диоптрия** – это величина, обратная одному метру:

$$1 \text{ дптр} = 1/\text{м} = 1000/\text{мм}.$$

Величина, обратная расстоянию в метрах от передней главной точки глаза до дальнейшей точки ясного зрения, называется **аметропией** A_R :

$$A_R = 1/a_R.$$

Величина, обратная расстоянию в метрах от передней главной точки глаза до ближайшей точки ясного зрения, называется **максимальным напряжением аккомодации** глаза A_P :

$$A_P = 1/a_P.$$

Величина, обратная расстоянию в метрах от передней главной точки глаза до точки фиксации, называется **напряжением аккомодации** глаза A_E :

$$A_E = 1/a_E.$$

Разность между аметропией и максимальным напряжением аккомодации определяет **объем аккомодации**:

$$A_{PR} = A_R - A_P.$$

Величины A_R , A_P , A_E и A_{PR} выражаются в диоптриях.

Глаз считается нормальным, или *эмметропическим*, если задний фокус его находится на сетчатке. В этом случае дальнейшая точка ясного зрения глаза находится в бесконечности $a_P = \infty$, аметропия равна нулю:

$$A_R = 0 \text{ дптр.}$$

Глаз, не удовлетворяющий этому условию, называется *аметропическим*.

Если дальнейшая точка находится перед глазом на конечном расстоянии, то глаз называется близоруким, или *миопическим*, при этом $a_R < 0$, $A_R < 0$, фокус оптической системы глаза F' находится перед сетчаткой (рис. 1.3, а).

Если дальнейшая точка ясного зрения находится за сетчаткой глаза, то глаз называется дальнозорким, или *гиперметропическим*, при этом $a_R > 0$, $A_R > 0$, фокус оптической системы глаза F' находится за сетчаткой (рис. 1.3, в).

Как в случае миопии, так и в случае гиперметропии изображения бесконечно удаленного объекта получаются на сетчатке глаза нерезкими. Если предмет расположить в плоскости, проходящей через точку R , то его изображение получится резким на сетчатке. В случае гиперметропического глаза при любом расстоянии до объекта его изображение не проецируется резко на сетчатку, т. к. точка R является мнимой.

Аметропия глаза вызывается ненормальной длиной глаза, неправильным положением хрусталика, а также ненормальными значениями кривизны преломляющих поверхностей и их несимметричностью относительно оси глаза.

Одним из условий высокой остроты зрения и хорошей контрастной чувствительности глаза является наличие на сетчатке резких изображений внешних объектов. Неисправленные аметропия и астигматизм глаза значительно портят изображение.

Коррекция аметропии и астигматизма глаза производится очковыми линзами, которые должны обеспечить резкость изображения удаленных объектов на сетчатке при покое аккомодации. Достигается это тем, что задний фокус очковой линзы, установленной перед

глазом, совмещается с дальнейшей точкой ясного зрения глаза. В случае **миопического** глаза для этой цели применяется **отрицательная** линза (рис. 1.3, б), а для **гиперметропического** – **положительная** (рис 1.3, г).

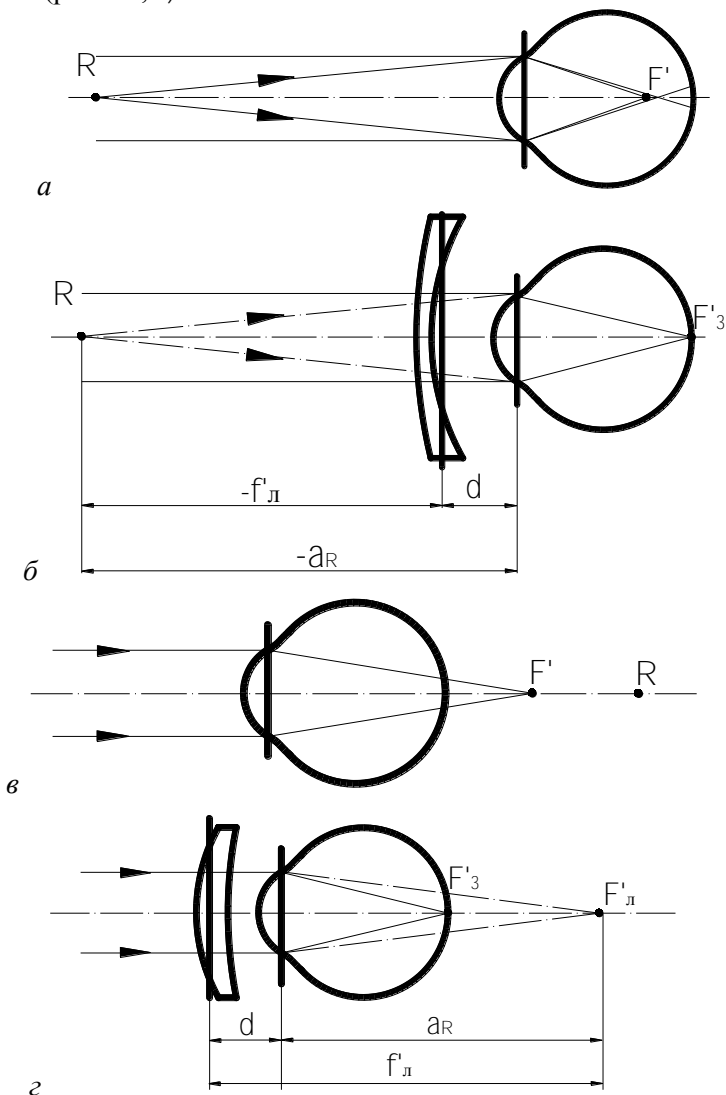


Рис. 1.3. Принцип исправления аметропии глаза очковой линзой

Чтобы величина изображения на сетчатке корригируемого глаза соответствовала величине изображения на сетчатке нормального глаза, необходимо, чтобы эквивалентное фокусное расстояние системы «линза + глаз» не изменилось по сравнению с фокусным расстоянием оптической системы глаза.

Итак, при установке очковой линзы величина эквивалентного фокусного расстояния системы «очковая линза + глаз» в сравнении с фокусным расстоянием глаза не изменяется, а происходит *смещение заднего фокуса* F' эквивалентной системы на сетчатку глаза.

С возрастом уменьшаются пределы аккомодации глаза, при этом ближайшая точка ясного зрения отодвигается, и глаз вынужден рассматривать ближние предметы с большего расстояния. Поскольку в этом случае угловые размеры мелких деталей предметов значительно уменьшаются, то разрешение глаза падает. Этот недостаток глаза, который носит название возрастной дальнозоркости или *пресбиопии*, исправляется посредством корригирующей положительной линзы, т. е. аметропический глаз должен быть вооружен в этом случае двумя видами очков: для дали и для близи или *бифокальными* (или многофокальными) очками.

Если аметропия глаза различна в двух меридиональных сечениях, такой глаз называется *астигматическим*. Меридиональные плоскости наибольшей и наименьшей аметропии в этом случае называются *главными сечениями* глаза. Причиной астигматизма глаза является обычно несферическая форма роговой оболочки или хрусталика. Количественно *астигматизм* глаза характеризуется разностью аметропий в главных сечениях глаза и положением последних.

Исправление астигматизма обычно производится, если его величина составляет 0,25 дптр и более. Для этого могут применяться цилиндрические линзы, которые представляют собой тела, ограниченные цилиндрической поверхностью и плоскостью, а также торические линзы, которые могут быть плоскаторическими, сфероторическими и тороторическими (обе поверхности линзы торические). Большинство всех применяемых в настоящее время астигматических линз имеет сфероторическую форму.

1.3. Классификация очковых линз

Очковая линза – основной элемент корректирующих и солнцезащитных очков, применяемых для коррекции аномалий рефракции, расстройств аккомодации, исправления недостатков мышечного аппарата глаза, а также для защиты органов зрения от ультрафиолетового и избыточного видимого света солнечного излучения.

Линза (от лат. *lens* – чечевица) – прозрачное тело, ограниченное двумя преломляющими световые лучи поверхностями, из которых хотя бы одна является поверхностью вращения.

Очковая линза характеризуется оптической силой, выраженной рефракцией. Рефракция (F) – величина, обратная фокусному расстоянию очковой линзы, измеренному в метрах. Единицей рефракции является диоптрия, которая выражается в обратных метрах (m^{-1}). В некоторых странах для обозначения рефракции используют символ (d).

Очковые линзы можно классифицировать по следующим признакам: применяемому материалу; числу оптических зон; знаку задней вершинной рефракции; возможности коррекции дефектов зрения; возможности коррекции дефектов зрения при косоглазии и слабости мышц глаза; наличию лентиккулярной фаски; технологии изготовления; наличию плоскости симметрии; номинальному положению оптического центра относительно геометрического.

В зависимости от применяемого материала очковые линзы подразделяются на минеральные и органические.

Минеральными называют линзы, изготовленные из бесцветного и цветного неорганического стекла. Неорганическое стекло – это твердый, аморфный, прозрачный в определенном оптическом диапазоне материал, получаемый при остывании расплава стеклообразующих компонентов (оксидов разнообразных химических элементов. Основу массы составляет оксид кремния).

Органическими называют линзы, изготовленные из синтетических полимерных материалов и различных добавок: УФ-абсорберов, пластификаторов. Органические линзы подразделяются на изготовленные из реактопластов (CR-39 и его сополимеры) и на изготовленные из термопластов (поликарбонат). Линзы из реактопластов отличаются повышенной абразивостойкостью, а из поликарбоната – более высокой устойчивостью к ударным нагрузкам. Промежуточное положение между реактопластами и термопластами занимают

линзы из нового материала Trivex, который является квазиреактопластом и объединяет преимущества обоих видов органических материалов. Условное обозначение линз, изготовленных из полимерного материала, – П. Линзы, изготовленные из неорганического стекла, не обозначаются.

По числу оптических зон коррекции аметропии зрения линзы бывают афокальными, однофокальными и многофокальными.

Афокальными, или плановыми, линзами называются линзы, не имеющие оптической силы. Такие линзы применяются в обычных солнцезащитных и защитных очках. Афокальная линза имеет нулевое оптическое действие в каждом меридиональном сечении.

Однофокальные линзы имеют одну зону оптического действия, или предназначены для коррекции зрения на одном расстоянии видения.

Многофокальные линзы имеют две или более зон оптического действия. Они подразделяются на трансфокальные, или вариофокальные (с плавно меняющимися переходами зон оптического действия), и со ступенчатым изменением рефракции: бифокальные, трифокальные и четырехфокальные (имеющие соответственно две, три, четыре зоны оптического действия). Вариофокальные линзы для коррекции пресбиопии (старческой дальнозоркости) называются прогрессивными. Многофокальные линзы служат для улучшения четкости видения предметов, находящихся на разных расстояниях, и применяются при ослабленной аккомодации.

По знаку задней вершинной рефракции (по положению главного фокуса) линзы разделяются на положительные (собираемые), назначаемые при дальнозоркости, и отрицательные (рассеивающие) – при близорукости.

У положительных линз главный фокус находится позади стекла, у отрицательных перед ним. С их помощью изображения удаленных предметов совмещается с сетчаткой глаза.

По возможности коррекции дефектов зрения очковые линзы подразделяются на стигматические и астигматические.

Стигматическими очковыми линзами называются линзы, обе преломляющие поверхности которых сферические. Стигматические линзы в каждом меридианном сечении имеют одинаковую преломляющую силу.

Стигматическая линза – линза, сводящая пучок параксиальных световых лучей в один фокус. Условное обозначение линзы – С.

Астигматическая линза – линза, сводящая пучок параксиальных световых лучей в два различных фокуса, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Астигматическая линза в отличие от стигматических характеризуется двумя значениями оптической силы линзы в двух взаимноперпендикулярных главных сечениях. Линзы, называемые тороидальными, сфероцилиндрическими и битороидальными, являются астигматическими.

По возможности коррекции дефектов зрения при косоглазии и слабости мышц глаза линзы разделяются на призматические и непризматические.

Призматическая линза – линза, обладающая заданным призматическим действием в геометрическом центре. Призматическое действие – отклонение светового луча, при прохождении через заданную точку на линзе, от первоначального направления. Геометрическим центром является точка, равноудаленная от любой точки наружного диаметра нефацетированной линзы. Нефацетированной линзой называется очковая линза, которая имеет оптически обработанные поверхности и которая не обрезана до окончательных размеров и формы, соответствующих какой-либо оправе.

В зависимости от наличия лентиккулярной фаски очковые линзы подразделяются на лентиккулярные и нелентиккулярные.

Лентиккулярная линза (условное обозначение Л) это линза, у которой оптически активной является только центральная зона заданного диаметра и у которой для облегчения веса утончен край. Лентиккулярный дизайн позволяет резко уменьшить толщину и вес линз, особенно у положительных очковых линз.

Оптическая зона лентиккулярных линз (апертура) может быть как сферической, так и асферической. Обычно они литые (положительные имеют выпуклость на передней стороне, отрицательные вогнуты на задней стороне), цилиндр расположен на противоположной поверхности линзы. Отрицательные часто изготавливают точением.

По технологии изготовления очковые линзы подразделяются на цельные, спеченные и склеенные.

Цельная линза – это линза, сделанная из цельного куска материала. Она может быть как пластиковой, так и стеклянной. У пластиковых линз одна поверхность изготавливается литьем, а другая шлифованием. Иногда обе поверхности изготавливаются литьем. У стеклянных линз обе поверхности изготавливаются шлифованием.

Спеченные линзы (условное обозначение **С**) изготавливаются вплавлением сегмента с относительно высоким показателем преломления в вогнутую поверхность основной линзы с более низким показателем преломления. Практически все стеклянные бифокальные линзы спеченные.

Склеенные линзы (условное обозначение **К**). У склеенных бифокальных линз сегмент, предназначенный для зрения вблизи, приклеен к поверхности однофокальной очковой линзы. Таким образом можно получить линзу с сегментом любой формы, причем расположенным в любом месте базовой очковой линзы. Это бывает необходимо, если образ жизни пациента предъявляет неординарные требования к конструкции линз.

По наличию плоскости симметрии очковые линзы подразделяются на линзы для коррекции правого глаза (условное обозначение 1) и для коррекции левого глаза (условное обозначение 2).

В зависимости от номинального положения оптического центра относительно геометрического, очковые линзы подразделяются на центрированные и децентрированные. Оптический центр – это точка на какой-либо поверхности линзы, через которую световой луч, падающий нормально на данную поверхность, проходит через линзу, не испытывая каких-либо отклонений. Децентрированная линза – это линза, которая имеет заданную децентрацию.

Приведенная классификация очковых линз дана в соответствии с ГОСТ 30808.

Кроме этого очковые линзы можно также классифицировать по значению коэффициента светопропускания (изготовленные из бесцветного оптического стекла), из цветного стекла, из фотохромного стекла, кроме того линзы могут быть окрашенными с поверхности (органические) или иметь спектральные покрытия. Линзы из цветного стекла называются окрашенными в массе и служат в качестве **солнцезащитных**, лечебных.

Фотохромными называются линзы переменного светопропускания. На открытом воздухе их светопропускание уменьшается под воздействием естественного солнечного излучения (особенно его ультрафиолетовой составляющей), и вновь восстанавливается в закрытом помещении.

По значению показателя преломления n_e минеральные и органические линзы разделяются на традиционные – с n_e 1,50–1,52; со

средним значением показателя преломления – n_e от 1,52 до 1,59 и высокопреломляющие – n_e от 1,6 и выше. У минеральных линз самый высокий на сегодня показатель преломления составляет 1,9, у органических – 1,74.

Очковые линзы могут иметь на обеих поверхностях разнообразное оптические покрытия, которые существенно улучшают их потребительские свойства.

ГЛАВА 2. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ОЧКОВЫХ ЛИНЗ

Применяемые для коррекции дефектов зрения стеклянные очковые линзы подразделяются на стигматические, астигматические, призматические и бифокальные (рис. 2.1).

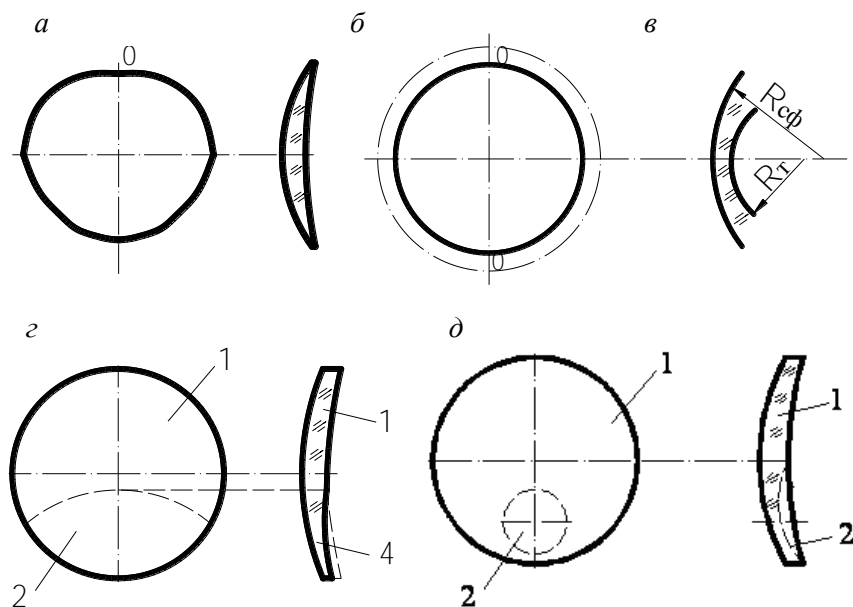


Рис. 2.1. Схемы стеклянных очковых линз, применяемых для коррекции дефектов зрения

Стигматические линзы (рис. 2.1, а) являются наиболее распространенными. Они имеют пантоскопическую или круглую (рис. 2.1, а, б) формы. У этих линз обе поверхности сферические.

Астигматические линзы ограничиваются сферической $R_{сф}$ и торической R_T поверхностями (рис. 2.1, в) или торической и какой-либо другой асферической поверхностью.

Призматические линзы ограничиваются сферическими поверхностями.

Бифокальные линзы (рис. 2.1, г, д) имеют две зоны 1 и 2 с различными вершинными рефракциями: «для дали» и «для близости».

Стекло для изготовления очковых линз должно соответствовать следующим основным требованиям: показатель преломления $n_d = 1,520$. Допускаемые отклонения Δn_d в зависимости от значений вершинной рефракции изменяются в пределах от $\pm 0,01$ (для рефракции до 2 дптр) и до $\pm 0,005$ (для рефракции свыше 5 дптр). Светопоглощение не более 3%. Свилы, видимые невооруженным глазом в стекле, не допускаются; в центральной зоне диаметром 10 мм также не допускаются пузыри и точки, видимые в проходящем свете невооруженным глазом.

Исходными заготовками для очковых линз, как правило, являются прессовки. В этом случае нагретые до температуры 800–1100 °С в зависимости от марки стекла нарезки 2 укладывают в матрицу 1 пресс-формы (рис. 2.2, а). Затем на пневматическом прессе пуансоном 4 штампуют заготовку-прессовку 3 (рис. 2.2, б).

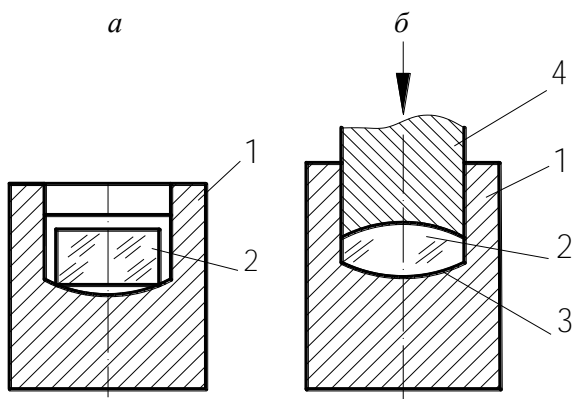


Рис. 2.2. Схема получения заготовок стеклянных линз прессованием

Для получения качественной поверхности прессовки пуансон 4 подогревают до температуры 350–550 °С. На поверхности прессовки 3 выдавливается клеймо, указывающее марку стекла, номер партии стекла и радиус сферической поверхности.

После этого, полученные прессовки подвергают отжигу для снятия внутренних напряжений, вызывающих двойное лучепреломление в стекле.

2.1. Основные сведения о процессах шлифования и полирования поверхностей стеклянных заготовок

Изготовление оптических деталей с точными и чистыми поверхностями достигается при помощи абразивных (алмазных) порошков в ходе протекания двух основных процессов их механической обработки – шлифования и полирования.

Шлифование используется для придания изделиям необходимых форм и размеров, а также получения поверхностей с очень тонкой матовой структурой. Для формообразования поверхности с постепенным снижением ее шероховатости последовательно производят грубое, среднее и тонкое шлифование. Оно может выполняться как свободным, так и связанным абразивом.

Сущность шлифования свободным абразивом заключается в перекатывании или проскальзывании зерна абразива между инструментом и стеклом (рис. 2.3, а).

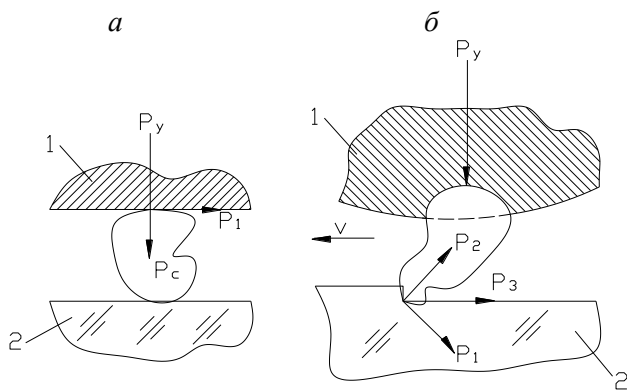


Рис. 2.3. Схема взаимодействия абразивного (алмазного) зерна с инструментом (1) и обрабатываемой поверхностью (2) в процессе шлифования:
а – свободным абразивом; б – связанным абразивом

При этом работу выкалывания производят как некруглые зерна, ударяя по поверхности, так и круглые, образуя при качении трещины, идущие вглубь. При пересечении трещин происходит выкалывание частиц с поверхности и образование рельефного слоя, состоящего из бугорков и впадин. Проникающие под рельефный слой материала части трещин образуют так называемый трещиноватый или предразрушенный слой.

Вода при шлифовании распределяет зерна по поверхности, удаляет продукты разрушения, улучшает условия движения зерен и способствует разрушению и охлаждению стекла. Глубина трещин зависит от размера и механической прочности абразивного (алмазного) порошка, которым производят шлифование.

При шлифовании связанным абразивом рабочая поверхность инструмента состоит из закрепленных в связке зерен, выступающие грани и ребра которых перемещаются по поверхности обрабатываемого материала (рис. 2.3, б). При этом более острые зерна, воздействуя на поверхность, образуют царапины и, следовательно, трещины, а закругленные оставляют значительно меньшие разрушения.

Одновременно с этим процессом происходит разрушение и изнашивание материала связки, в результате чего закрепление в ней зерен постепенно ослабевает и они выпадают из нее. Постоянство эффективности работы инструмента обеспечивается непрерывным поддержанием необходимой пропорции между степенью закрепления зерен в связке, скоростью их притупления и изнашиваемости связки. Это свойство инструмента с закрепленными зернами называется *самозатачиваемостью*.

При взаимном перемещении инструмента и изделия работающие зерна проходят по одинаковым и непрерывно повторяющимся траекториям, оставляя в этих же направлениях царапины. Поэтому структура этих шлифованных поверхностей отличается направленностью следов обработки. В результате шлифования инструментом со связанным абразивом создается поверхность, форма которой обусловлена не только формой самого инструмента, но и траекторией перемещения его рабочей поверхности относительно обрабатываемого изделия.

Таким образом, процесс шлифования хрупких материалов представляет собой интенсивное разрушение с образованием царапин, трещин и выкалывание материала. Этот процесс состоит из ком-

плекса механических и физико-химических процессов, происходящих на поверхности обрабатываемого материала.

На интенсивность процесса шлифования влияют как давление на инструмент (деталь), так и скорость их относительного движения. При шлифовании свободным абразивом давление составляет $10\text{--}20 \text{ кН/м}^2$, а скорость относительного движения (по краю) при грубом шлифовании $5\text{--}15 \text{ м/с}$ и $0,4\text{--}1,5 \text{ м/с}$ при чистовом шлифовании.

При шлифовании связанным абразивом давление несколько возрастает, а скорость составляет $20\text{--}25 \text{ м/с}$. Предпочтение отдается алмазному шлифованию.

С помощью **полирования** устраняются практически все неровности, размер которых превосходит сотые доли микрометра. Поверхность становится гладкой и прозрачной. Последнее связано с тем, что неровности поверхности оказываются меньше длины волны видимой области спектра ($1/4\text{--}1/8$).

Процесс полирования стекла водными суспензиями полирующих порошков имеет более сложную, чем шлифование физико-химическую природу. Зерна полирующего порошка, взвешенные в воде (полирующая суспензия), находятся между притирающимися поверхностями полировальника и стекла. Полировальник имеет смоляной рабочий слой. Неровности шлифованной поверхности стекла и смоляной поверхности полировальника значительно больше размеров зерен полирующего порошка. При этом поверхность вязкого смоляного полировальника, пластически деформируясь, выглаживается по шлифованной с острыми микронеровностями поверхности стекла.

Зерна полирующего порошка, состоящего главным образом из окислов железа или церия, имеют размеры $0,2\text{--}2 \text{ мкм}$. Суспензия, в которой взвешены зерна, в первые моменты подачи растекается, и зерна закрепляются, адсорбируясь в наружном слое смолы. При относительном перемещении изделия и полировальника зерна полирующего абразива срезают ультрамикроскопические частицы, пластически деформируя поверхностный слой стекла.

Определенную роль в процессе полирования играют и химические процессы (реакции), т. е. происходит гидролиз частиц стекла, размер которых примерно равен 10^{-2} мкм , в результате чего образуется тонкая коллоидная пленка, заполняющая дефекты на полируемой поверхности. В процессе полирования происходит как бы срывание этой пленки и образование новой. Толщина этой коллоидной

пленки составляет 0,01 мкм. Для предварительного полирования применяют давление до 100 кН/м² и скорость порядка 5–10 м/с. Для окончательного полирования эти параметры значительно меньше.

2.2. Формообразование сферических поверхностей

Формообразование сферических поверхностей осуществляется механическим путем двумя способами: принудительным формообразованием и способом свободного притира.

В основе схемы принудительного формообразования лежит геометрия пространственного пересечения двух тел (рис. 2.4) тонкостенного цилиндра 1 диаметром D (инструмента) и изделия 2. Оба тела жестко связаны с осями вращения OK и OZ соответственно, которые лежат в одной плоскости и пересекаются в точке O под некоторым углом α . При вращении этих тел и перемещении одного из них вдоль оси OZ кромка инструмента выбирает в теле изделия поверхность, все точки которой лежат на окружности, образованной вращением инструмента вокруг оси OK , и поэтому равноудалены от точки O .

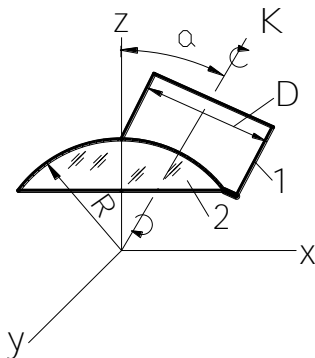


Рис. 2.4. Схема принудительного формообразования сферической поверхности:
1 – инструмент; 2 – обрабатываемая заготовка

В то же время все точки поверхности, выбранной инструментом, образуют тело вращения вокруг оси OZ и также равноудалены от точки O . Данному геометрическому свойству соответствует сфера, уравнение которой в принятой системе координат соответствует:

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2.$$

В зависимости от положения кромки инструмента относительно оси вращения изделия OZ может быть получена сферическая поверхность с радиусом

$$R = \frac{D}{2 \sin \alpha}.$$

Таким образом, радиус сферической поверхности линзы обратно пропорционален углу α . При $\alpha = 0$ $R = \infty$, что соответствует плоской поверхности.

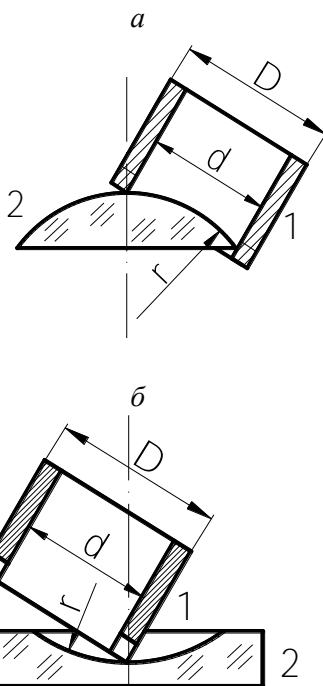


Рис. 2.5. Положения рабочей кромки алмазного инструмента (1) в зависимости от формы поверхности заготовки (2):
a – для выпуклой сферической поверхности;
б – для вогнутой сферической поверхности

На рис. 2.5 показаны положения рабочей кромки алмазного инструмента при обработке выпуклой и вогнутой сферических поверхностей.

Способ формообразования сферической поверхности свободным притиром основан на взаимном износе поверхностей двух тел (инструмента и детали), которые контактируют друг с другом непосредственно (связанный абразив) или через прослойку свободного абразива. На рис. 2.6 представлена схема формообразования способом свободного притира.

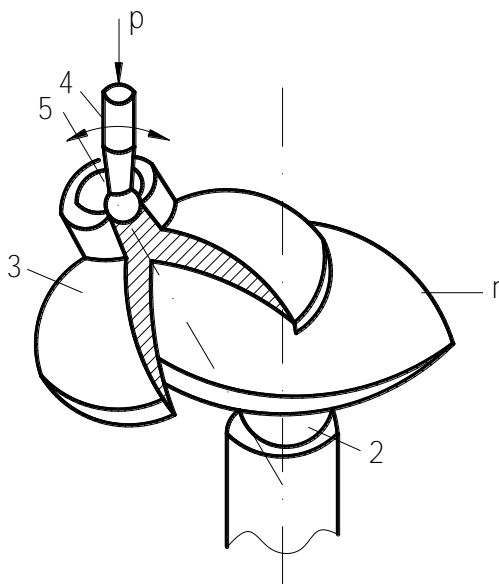


Рис. 2.6. Схема формообразования сферической поверхности заготовки способом свободного притира

Нижнее звено 1, функцию которого может выполнять как инструмент, так и изделие, жестко связано с осью 2 и вращается вместе с ней. Верхнее звено 3 (изделие или инструмент) прижимается к нижнему собственной массой и силой нажатия поводка 4.

Шаровой шарнир 5, посредством которого соединены между собой поводок и верхнее звено, позволяет последнему свободно устанавливаться на поверхности нижнего звена. Верхнее звено под действием сил сцепления с нижним приходит в самопроизвольное «свободное» вращение на притирающейся поверхности нижнего звена. Поводок станка под действием кривошипно-шатунного механизма

совершает возвратно-колебательные движения. При формообразовании сферических поверхностей ось вращения звена проходит через шаровой шарнир и центр общей сферы притираемых поверхностей.

В процессе обработки поверхности становятся соответствующими друг другу, отличаясь на размер зазора, образуемого абразивной прослойкой. Большое число одновременно работающих шлифующих или полирующих зерен абразива обеспечивает высокую равномерность микроструктуры обрабатываемой поверхности. Этот способ позволяет на несложном оборудовании получать достаточно точные сферические поверхности.

2.3. Вспомогательные операции в технологии изготовления очковых линз

К таким операциям относятся: блокировка (закрепление заготовок на приспособлении), разблокировка (снятие заготовок линз с приспособления), промывка линз и приспособлений и нанесение на обрабатываемые поверхности защитных покрытий.

Блокировка. Применяется механический способ крепления линз для их обработки и с помощью наклеивания смолой или легкоплавким металлом.

Механическое крепление линз целесообразно использовать при их одноместной обработке. Крепление линз в этом случае осуществляется в гнезде оправки с помощью многолепесткового цангового зажима на пружинной диафрагме. Для предотвращения сколов на линзе по ее краям устанавливают эластичные прокладки (фибра, текстолит, капрон).

Крепление линз с помощью смолы достигается приклеиванием их с помощью тонкого слоя смолы (толщиной 0,03–0,3 мм) при шлифовании и просмоленной матерчатой прокладки (марля, бязь) при полировании поверхностей. В зависимости от формы линзы и требований к ней изготавливают различные наклеенные приспособления. При обработке выпуклых поверхностей применяют грибы с посадочными гнездами-лунками или шайбами (рис. 2.7, а). Конструкция посадочного гнезда определяется формой наклеиваемой поверхности, типом линзы и особенностями технологии ее обработки.

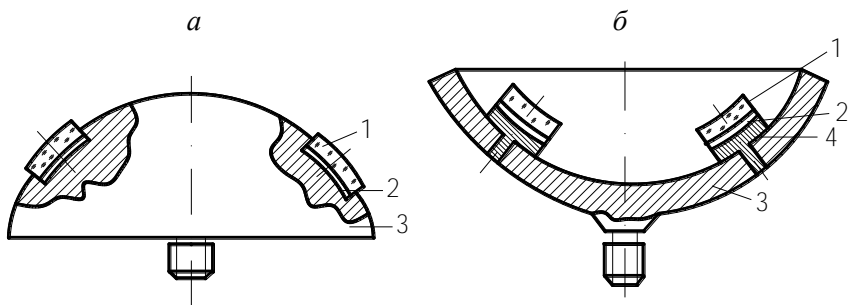


Рис. 2.7. Схема блокировки заготовок линз на клеечном приспособлении:
а – на грибе; *б* – на чашке; 1 – заготовки линз; 2 – смоляной слой;
 3 – клеечное приспособление; 4 – шайба

Для крепления линз с вогнутыми поверхностями применяют чашки с отверстиями или шайбами (рис. 2.7, *б*). Для удобства снятия линз с клеечных приспособлений на лунках и шайбах имеются канавки шириной 2–4 мм и глубиной 1–3 мм.

Кривизна приспособлений, лунок и шайб должна быть выдержана с высокой степенью точности. Радиусы кривизны лунки и шайбы должны обеспечивать в центре зазор 0,1–0,2 мм. В центре лунки или шайбы протачивают цилиндрическое углубление диаметром около $\frac{1}{2}$ диаметра линзы. С целью обеспечения одинаковой толщины линз глубину лунок и толщину шайб выдерживают с допуском 0,1–0,05 мм.

Наклеечное приспособление и линзы нагревают на электрических плитках, покрытых листовым асбестом, или в термостатах. Температура нагрева клеечных приспособлений 80–110 °С, а линз 50–70 °С. На посадочные места для линз накладывают смолу или прокладки, а затем устанавливают линзы и равномерно прижимают их с помощью деревянного прижима. Избежание косины обеспечивается равномерной толщиной смоляного слоя или прокладки и совмещением диаметра линзы с диаметром посадочного места клеечного приспособления.

При одноместной обработке линз все более широкое применение находит способ соединения металлического блока с линзой при помощи легкоплавкого металла. Например, сплава Вуда (висмут – 50 %, свинец – 25 %, олово – 12,5 % и кадмий – 12,5 %), который имеет

температуру плавления 60–90 °С. Блокировка производится в специальных приспособлениях путем заливки расплавленного металла в пространство между металлическим блоком и закрепляемой линзой.

Разблокировка. Применяются несколько способов разблокировки: охлаждение до температуры –15...–70 °С, механическое отсоединение линз от блока и нагревание до температуры размягчения смолы или расплавления металла. Последние методы приемлемы для жесткого метода блокировки, т. к. после дополнительного нагревания на приспособление можно наклеивать новую партию линз, что существенно сокращает вспомогательное время в процессе изготовления очковых линз.

В качестве защитных покрытий при изготовлении очковых линз используют нитроэмаль, цапонлак, фторопласт и битумные лаки. К ним предъявляются следующие основные требования: высокая адгезия к наклеечной смоле и стеклу; химическая пассивность; возможность образования при высыхании гладкой однородной пленки и легкая удаляемость с помощью растворителей.

Промывка линз и приспособлений. Эта операция выполняется для очистки линз и приспособлений от смолы, лака и других загрязнений после разблокировки. Промывку выполняют в три или два приема в зависимости от вида наклеечного материала. Первые стадии операции – растворение смолы и лаков, завершающий этап – ополаскивание. Процесс осуществляется в различных ваннах вручную, а при использовании ультразвуковой очистки – в ультразвуковых ваннах.

Для очистки линз применяют бензин, ацетон, этиловый спирт или смесь органических растворителей: ацетон 15 % и этиловый спирт 85 %. Эти растворители быстро и эффективно удаляют загрязнения, растворяют защитные лаки, наклеечные смолы и другие вещества.

Чистая вода при комнатной температуре способствует удалению шлифующих и полирующих абразивов. Применение 5–10 % растворов КОН и NaOH для растворения наклеечных смол и защитных лаков возможно в процессе изготовления линз, за исключением промывки полированных поверхностей, т. к. щелочь вызывает разрушение и вскрывает заполированные царапины.

Протирачные материалы и методы сушки линз. Вымытые линзы при переходе от фрезерования к шлифованию протирают полотенцем из льняного или хлопчатобумажного полотна. Для вытирания

полированных поверхностей применяют салфетки из ситца, батиста, бязи, белой фланели. Во время контроля готовых линз пылинки с них удаляют мягкими беличьими или хорьковыми кисточками.

В условиях массового производства сушка линз производится при помощи специальной жидкости в последней промывочной установке при окунании в нее кассеты с подготовленными линзами. Этот метод исключает применение протирочных материалов и называется химической сушкой.

2.4. Способы обработки асферических поверхностей и астигматических линз

Обработка асферических поверхностей осложняется рядом присущих им особенностей. К одной из них следует отнести наличие у асферической поверхности только одной оси симметрии. Это затрудняет равномерное срабатывание детали и инструмента. Второй особенностью таких поверхностей является значительная трудоемкость их центрировки по сравнению с центрировкой сферических поверхностей. Поэтому, если одна из поверхностей линзы является сферической, то ее обрабатывают первой, принимая за основную. После центрировки линзы по сферической поверхности обрабатывают асферическую.

Известен способ обработки параболических поверхностей, который получил название метод «ножа». В этом случае предварительно изготавливаются очковые линзы сферической формы с радиусом кривизны R , близким к требуемой параболе. Затем выполняют формообразующую операцию с применением технологической схемы, представленной на рис. 2.8.

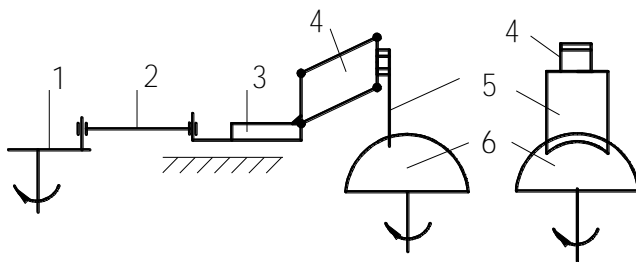


Рис. 2.8. Схема обработки параболической поверхности линзы ножевым инструментом

При вращении кривошипа 1 через шатун 2 ползуну 3 сообщается возвратно-поступательное движение. Связанный с ползуном 3 через рычажную систему 4 инструмент 5 совершает перемещение по обрабатываемой поверхности линзы 6. При этом инструмент в виде тонкой металлической (латунной) пластины-ножа скользит по поверхности вращающейся заготовки, оставаясь все время параллельным оси ее вращения. Через некоторое время пластина приобретает параболический профиль, а заготовка, благодаря воздействию абразива, приобретает соответствующую форму параболоида. Это происходит из-за разной интенсивности износа в центре заготовки и на ее крае, что обусловлено различной скоростью относительного скольжения инструмента и заготовки в этих зонах. Чем дальше от центра, тем выше значение этой скорости, а соответственно и съем материала с поверхности заготовки.

Следует подчеркнуть, что в реальных условиях взаимной притирки инструмента и заготовки не удастся получить параболоид вращения идеальной формы из-за влияния различных технологических факторов. В частности, конечной толщины инструмента, неравномерности возвратно-поступательного движения «ножа» и неточности направления его движения и т. д. Поэтому участок поверхности, форма которого в процессе обработки больше всего приближается к параболической, составляет порядка 50–55 % диаметра детали.

Полировальник также представляет собой «нож», у которого полирующий слой закреплен на линейной державке полировальника или на оправке в виде плоского просмоленного фетра толщиной не более 5 мм. Малая площадь контакта обуславливает малую производительность и поэтому процесс формообразования параболоидной и других асферических поверхностей методом линейного соприкосновения довольно длительный.

Находят применение астигматические линзы, которые имеют одну поверхность торической формы, другую – в виде сферы. Торические поверхности представляют собой поверхности, у которых кривизна в главных сечениях различна и постоянна, т. е. в меридиональном сечении радиус кривизны одного значения, а в противоположном ему (сагиттальном) – другого и может быть даже отличным по знаку.

Такие поверхности подобно сферическим обрабатываются посредством алмазного фрезерования, шлифования и полирования при

взаимном притирании сегментного торического инструмента и обрабатываемой поверхности на специальных станках.

Так как размер обрабатываемой поверхности вдоль образующей не равен поперечному размеру, то в процессе изготовления должна быть обеспечена возможность раздельной регулировки величин возвратно-поступательного перемещения инструмента и вращения блока с закрепленными на нем линзами.

На рис. 2.9, *а* представлена схема механической обработки торической поверхности при блочном методе на станках с горизонтально расположенным шпинделем, а на рис. 2.9, *б* – с вертикально расположенным шпинделем, которые применяются при больших радиусах кривизны торической поверхности.

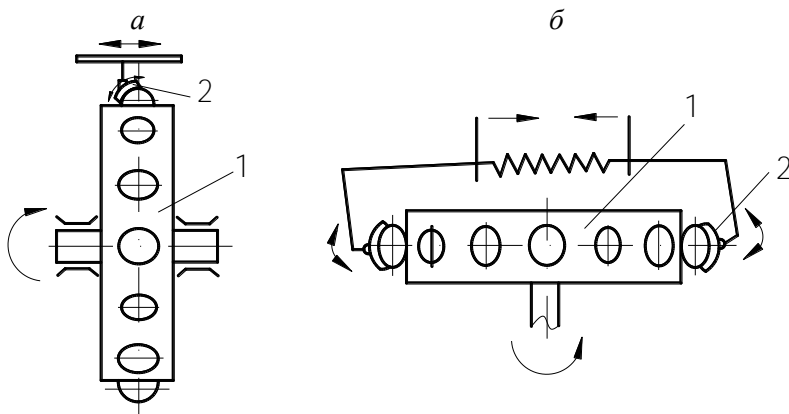


Рис. 2.9. Схема обработки торической поверхности линз при блочном методе на станках:

а – с горизонтально расположенным шпинделем;

б – с вертикально расположенным шпинделем

Торический блок 1 с закрепленными на нем линзами обрабатывается каблучковым (торическим) шлифовальником 2 (при полировании – аналогичным полировальником).

Рабочая поверхность этих инструментов имеет торическую форму, один радиус кривизны которой соответствует радиусу кривизны блока 1 с закрепленными линзами, а другой радиус кривизны этой поверхности, перпендикулярный первому, формирует аналогичный

радиус готовой линзы. Каблучковые (торические) шлифовальники (полировальники) 2 совершают только колебательные движения.

Для изготовления торических поверхностей астигматических очковых линз наиболее широко применяется трубчатый инструмент (рис. 2.10).

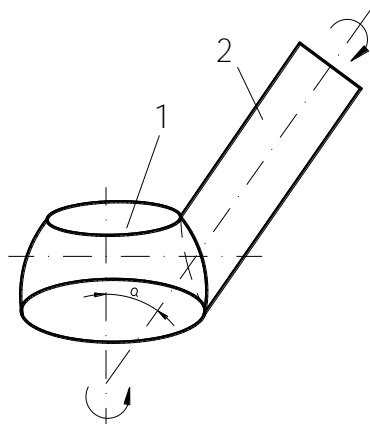


Рис. 2.10. Схема обработки торических поверхностей астигматических очковых линз с помощью трубчатого инструмента

В этом случае оси инструмента 2 и заготовки 1 не должны лежать в одной плоскости ($\alpha \neq 0$), т. к. при $\alpha = 0$ получится сферическая поверхность. Трубчатый инструмент 2 (алмазное кольцо) вращается вокруг своей оси, и его рабочая кромка во время обработки непрерывно правится. В положительных астигматических линзах выпуклая сторона является торической. С формирования этой стороны заготовки начинается процесс изготовления линзы. Последовательность операций в принципе такая же, как при изготовлении стигматических очковых линз. Кривизну поверхности контролируют в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью шаблона.

2.5. Способы изготовления призматических очковых линз

Призматическое действие очковой линзы достигается за счет разнотолщинности ее взаимно противоположных краев, т. е. клин изготавливается не с плоскими, а со сферическими, сфероторически-

ми и другими поверхностями. В связи с тем, что потребность в таких линзах невелика, а число сочетаний различных комбинаций достаточно большое, изготавливать призматические линзы целесообразно небольшими партиями или вообще по одной.

При механической обработке на станках призматических линз в наклеечном приспособлении применяют переходные призматические вкладыши, а при эластичной блокировке – косые смоляные подушки (рис. 2.11).

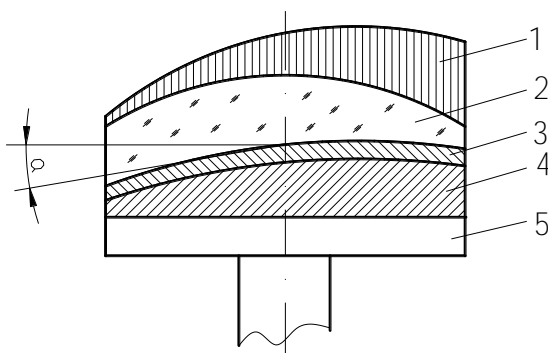


Рис. 2.11. Схема блокировки заготовки при обработке призматической линзы:
1 – снимаемый припуск; 2 – призматическая линза; 3 – клеящий слой;
4 – призматический вкладыш; 5 – нижний шпindelь станка

Как вкладыш, так и подушка придают наклон заготовке линзы на угол θ . Оба метода обеспечивают получение линзы с требуемой разнотолщинностью краев.

Дальнейший процесс изготовления после получения призматической заготовки и закрепления ее на наклеечном приспособлении осуществляется обычным путем в той же последовательности, что и изготовление стигматических очковых линз.

Изготовление сферопризматических элементов начинается с обработки вогнутой стороны ее заготовки. Шлифование и полирование этой стороны производится на обычных сферических блоках. Выпуклая сторона обрабатывается с использованием жесткого метода блокировки на специальном наклеечном приспособлении (грибе), обеспечивающем одновременное получение необходимой клиновидности сферопризматического элемента.

Особенность наклеенного гриба заключается в том, что лунки в нем расположены под определенным углом к нормали сферической поверхности самого гриба, т. е. один край наклеенной оптической детали выступает над сферической поверхностью гриба больше, чем другой (рис. 2.12).

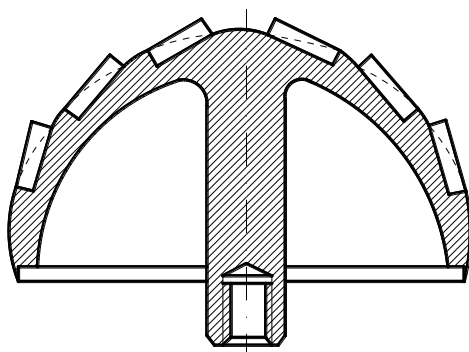


Рис. 2.12. Вид наклеенных на грибе сферопризматических элементов

Блок с наклеенными элементами сферопризматических линз обрабатывается трубчатым алмазным инструментом, а затем поступает на шлифование и полирование.

2.6. Способы изготовления бифокальных линз

Бифокальные очковые силикатные линзы можно получить тремя способами: спеканием, шлифованием и склеиванием.

Сущность *спекания* заключается в соединении деталей путем совместного нагрева при определенной температуре их полированных поверхностей. Такое соединение характеризуется высокой механической прочностью, герметичностью, устойчивостью к действию температуры и различных химических реагентов. При этом предъявляется требование, чтобы коэффициенты температурного расширения у соединяемых стеклянных заготовок были бы одинаковы или очень близки.

Основными технологическими операциями при изготовлении бифокальных очковых линз таким способом являются фрезерование,

шлифование и полирование соединяемых частей, тщательная их очистка, наложение одной детали на другую и фиксирование их взаимного положения в приспособлении, нагрев до температуры спекания, выдерживание при этой температуре в течение фиксированного времени под действием груза, отжиг для снятия напряжений.

При спекании бифокальных очковых линз в заготовку (основная линза) впекают дополнительную малую линзу (часть для близи) с другим более высоким коэффициентом преломления. Процесс изготовления начинается со шлифования и полирования лунки в заготовке, представляющей готовую одностороннюю очковую линзу, несколько увеличенную по толщине в центре. В эту лунку впекают дополнительную линзу, которая может иметь круглую или чаще сегментную форму. На этой заготовке формируется полированная поверхность, радиус кривизны которой немного меньше радиуса кривизны подготовленной к спеканию лунки в основной линзе (рис. 2.13).

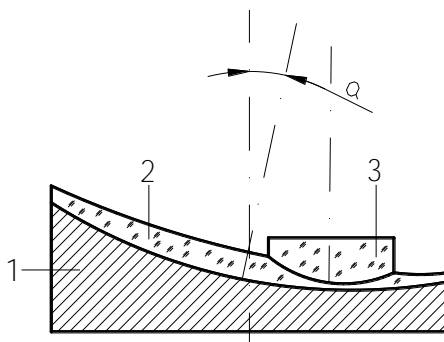


Рис. 2.13. Схема спекания заготовок бифокальных очковых линз

На жаропрочную металлическую подставку 1 с определенным углом наклона рабочей поверхности укладывают выпуклой стороной основную линзу 2. Малую заготовку 3 устанавливают в лунку основной линзы и закрепляют лентой из алюминиевой фольги. Спекание производится в электропечах в течение 42–43 часов.

После этого линзы подвергают отжигу и передают для выполнения дальнейших операций, которые аналогичны изготовлению однофокальных очковых линз. Современные спеченные бифокальные линзы имеют смещенную часть для близи, т. е. для левого и правого корригируемого глаза комплектуют пары линз.

При получении бифокальных линз методом *шлифования* в нижней части линзы шлифовальником выбирается зона для близи с радиусом кривизны, отличным от радиуса кривизны верхней части для дали. Так как обе части получаются из одной линзы, то их называют «цельными». Заготовками для таких линз служат готовые однофокальные линзы повышенной толщины. Обработку зоны для близи осуществляют по схеме, приведенной на рис. 2.14.

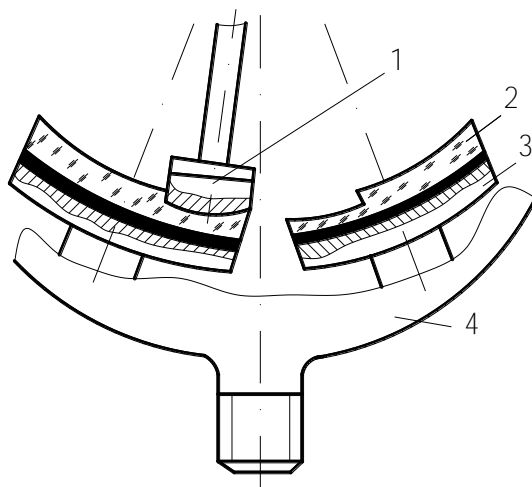


Рис. 2.14. Схема изготовления части для близи цельных бифокальных линз

Каждую заготовку 2 наклеивают выпуклой стороной на специальную установочную чашку 4 с хвостовиком и монтируют по три штуки на специальном приспособлении 3 для установки бифокальных линз. Этим обеспечивается ориентирование заготовки под определенным углом и на определенном расстоянии. Такую установку заготовок производят с помощью двух индикаторов часового типа, смонтированных на специальном установочном столе. Один из индикаторов определяет толщину заготовки по центру, другой по краю линзы (наклон линзы). Окончательную подгонку на требуемый размер производят металлическими или бумажными прокладками. Правильность положения линзы в чашке определяется разностью высот, которая меняется в зависимости от рефракции линзы.

Формирование части для близи производят на специальном станке для шлифования цельных бифокальных линз. Приспособление с тремя ориентированными заготовками закрепляется в нижней части станка. Сверху с помощью вращающегося цилиндрического инструмента 7 (см. рис. 2.14) производится обработка части для близи. Радиус кривизны рабочей части инструмента равен радиусу кривизны части для близи. Затем с помощью такого же полировальника осуществляется полировка обработанной поверхности.

Склеивание оптических деталей заключается в заполнении зазора между ними прозрачным клеем с последующим превращением этой жидкости в твердое вещество. Клей берется в избытке, что обеспечивает получение оптической толщины склеивающего слоя порядка 10–20 мкм.

К оптическим клеям предъявляются следующие требования:

- бесцветность, высокая прозрачность;
- оптическая однородность, наличие показателя преломления близкого к показателям преломления склеиваемых элементов;
- механическая прочность и термостойкость (± 60 °С);
- временная стабильность.

В настоящее время наибольшее распространение получили синтетические клеи, например, ОК–50П, состоящий из жидкой модификации диановой смолы и фракций полиаминов.

Перед склеиванием поверхности линз тщательно очищают, а для ускорения процесса полимеризации детали подогревают.

Приклеивание оптических деталей для получения бифокальной линзы чаще всего производят на фасетированной линзе, подготовленной для сборки в очковую оправу или уже вставленную в нее.

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОЧКОВЫХ ОПРАВ

3.1. Основные сведения об очковых оправках и их классификация

Очковая оправа предназначена для закрепления в ней очковых линз и правильной их установки перед глазами. Положение очковой оправы, обеспечивающее эффективную коррекцию зрения, показано на рис. 3.1. Эффективность достигается в том случае, если очковая оправа сконструирована с учетом следующих антропометрических параметров головы человека: $A_{\text{п}}^1$, $A_{\text{л}}^1$ – расстояния от центра переносицы до центра зрачков правого и левого глаз; B – ширина переносицы; B – расстояние между висками; Γ – расстояние между основаниями ушных раковин; Ж – высота переносицы; D – расстояние между переносицей и ушной раковиной.

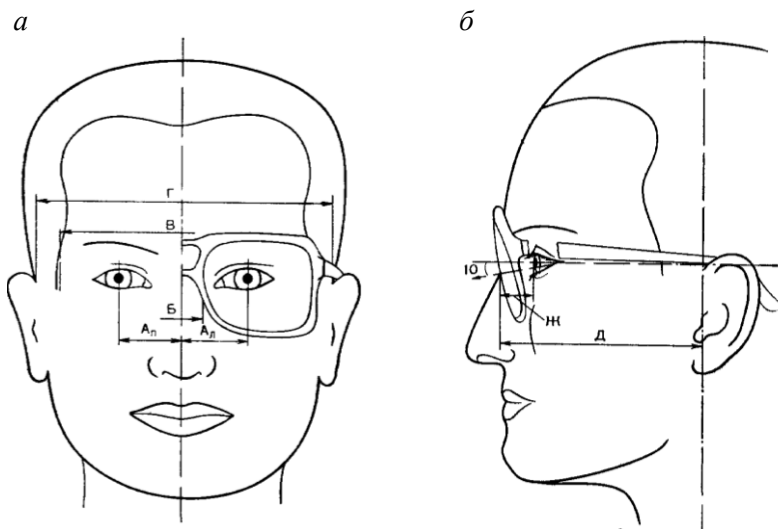


Рис. 3.1. Положение оправы корригирующих очков на лице пациента:
а – в фас; *б* – в профиль

В зависимости от применяемых материалов и конструкции заушников оправы делятся на три типа:

- пластмассовые;

- металлические;
- комбинированные с жесткими и эластичными заушниками.

Очковая оправа состоит из рамки 1, двух заушников 2 и шарнирных соединений 3 (рис. 3.2, а). Конструкция рамки включает в себя следующие элементы: ободки 4, переносицу 5, носовые упоры 6, створку шарнирного соединения (рис. 3.2, б).

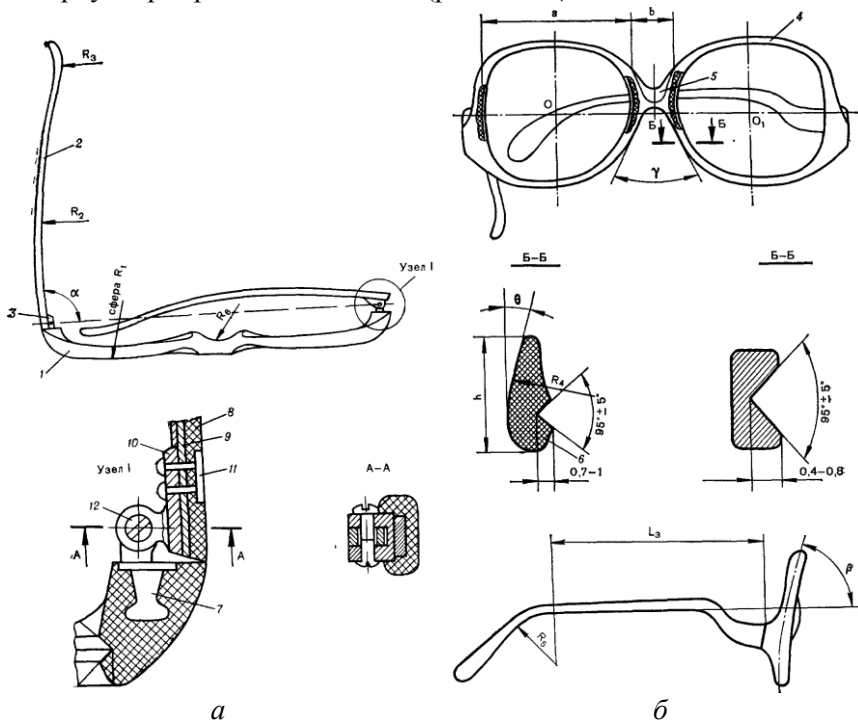


Рис. 3.2. Конструкция пластмассовой оправы

Линзы крепятся в рамку оправы с помощью фасетных канавок, расположенных на внутренней поверхности ободков (см. рис. 3.2, б) на одинаковом расстоянии от наружной поверхности. Очковая линза имеет сферические поверхности, поэтому для ее правильной установки в оправу ободкам рамки придается профиль по сфере с радиусом $R_1 = 100...160$ мм (см. рис. 3.2, а). Для установки линз в металлическую оправу на ободках в месте крепления створки шарнира предусматривается разъем. Он замыкается с помощью резьбовой колодки и винта.

Ободки рамки соединяются между собой переносицей. Она формируется или обрабатывается по радиусу R_6 (см. рис. 3.2, *а*), отвечающему кривизне носа. При расположении переносицы по линии OO_1 , соединяющей центры световых проемов рамки, радиус изгиба переносицы R_6 лежит в пределах 12–15 мм, а при расположении переносицы выше линии OO_1 радиус увеличивается.

В пластмассовых рамках переносица изготавливается совместно с ободками и имеет двояковыпуклое формоустойчивое сечение. В металлических рамках переносица припаивается к ободкам, а для придания ей жесткости дополнительно вводится верхняя перемычка.

Опорные элементы рамки – носопоры – в пластмассовых оправах имеют жесткую неподвижную конструкцию и выполняются механической обработкой или литьем совместно с ободками (см. рис. 3.2, *б*). Высота носопоров h составляет 7–12 мм, угол их отгиба θ – 10–30°, радиус закругления $R_4 = 12$ мм.

При изготовлении рамок из листа толщиной менее 5 мм носопоры приклеиваются к ободкам.

В металлических оправах носопоры выполняются чечевицеобразными из полимерных материалов. Они крепятся к ободкам *1* с помощью металлической ножки *2* (рис. 3.3). Носопор *3* надевается на ножку *2* и фиксируется на ней подвижно штифтом *4* (рис. 3.2, *б*) или неподвижно за счет плотной посадки (рис. 3.3, *а*).

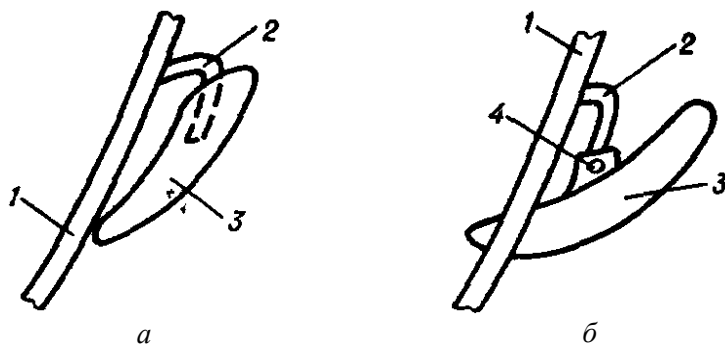


Рис. 3.3. Конструкция элементов металлической оправы:
а – жесткий носопор; *б* – подвижный носопор

Заушник пластмассовой оправы состоит из полимерного тела *8*, металлического армирующего стержня *9*, створки шарнира *10* и заклепки *11* (см. рис. 3.2, *а*). Армирующий стержень придает кон-

струкции заушника прочность в месте крепления створки шарнира и формоустойчивость по всей длине. Заушники шириной более 10 мм и толщиной не менее 3,5 мм могут выполняться без армирования.

Заушники металлической и комбинированной оправ изготавливаются либо жесткие с пластмассовыми наконечниками, либо эластичные с упругими наконечниками. Пластмассовые наконечники (рис. 3.4, *а*) крепятся на металлическую часть заушника *1* за счет плотной посадки и выступов на хвостике. Заушники с эластичным элементом (рис 3.4, *б*) обеспечивают надежную фиксацию оправы на лице и применяются в конструкциях очков для детей. Эластичная часть *3* заушника *1* должна обладать упругостью по всей длине и иметь закругленный конец.

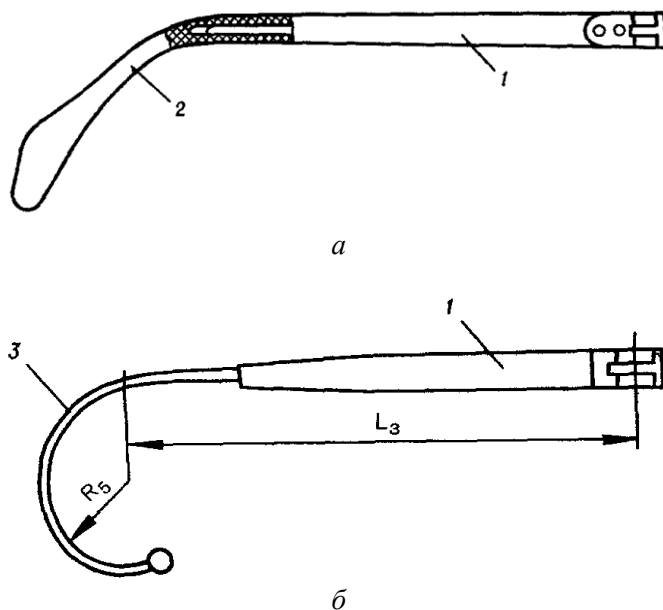


Рис. 3.4. Конструкция заушников для комбинированных оправ:
а – жесткий заушник; *б* – эластичный заушник

Рамка и заушники соединяются между собой посредством шарнирных узлов (см. рис. 3.2, *а*), которые состоят из двух створок и винта *12*, выполняющего роль оси. На рамку *1* устанавливается створ-

ка 7 с выступом, а на заушник 2 – створка с пазом 10. Створки крепятся к пластмассовой основе рамки и заушника с помощью заклепок 11. Заклепки проходят через расплюснутую часть армирующего стержня 9 и с наружной стороны заушника закрываются декоративной пластиной. К металлическим заушникам створки шарниров крепятся с помощью пайки или сварки.

При правильной установке створок шарниров оправа с раскрытыми до упора заушниками должна касаться ровной горизонтальной поверхности в четырех точках.

Каждая серийно изготавливаемая модель очковой оправы имеет ряд типоразмеров.

На открытом воздухе детали очковых оправ подвергаются действию атмосферных факторов. Кроме того, на поверхности оправ отлагаются различные активные выделения организма: пот, жир и т. д.

Перечисленные факторы приводят к старению и деструкции пластмассовых элементов оправ и коррозии металлических элементов. Для предотвращения этого на поверхность деталей металлических оправ наносят защитно-декоративные покрытия: оксид алюминия, хром, никель, медь, палладий, родий, золото, полимерные покрытия на основе эпоксидных порошков.

3.2. Технология изготовления металлических очковых оправ

3.2.1. Технология изготовления деталей очковых оправ

При изготовлении металлических деталей очковых оправ в качестве заготовок используют круглые и фасонные профили, а также заготовки, получаемые при раскрое ленты или полосы металла.

Технологические процессы изготовления деталей можно разделить на следующие группы:

1. Технология изготовления шарниров.
2. Технология изготовления винтов, штифтов, блоков замыкания и т. д.
3. Технология изготовления ободков.
4. Технология изготовления угольников.
5. Технология изготовления заушников.
6. Технология изготовления перемычек.
7. Технология изготовления держателей носовых упоров.

Технология изготовления шарниров. Шарниры для очковых оправ изготавливаются двух типов: накладные (рис. 3.5, *а, в*) и гарпунные (рис. 3.5, *б*). Накладные шарниры используются как в пластмассовых, так и в металлических оправках. Они крепятся заклепками (рис. 3.5, *а*), пайкой или сваркой (рис. 3.5, *в*). В зависимости от конструкции височной части оправы применяются створки шарниров с горизонтальным, вертикальным или наклонным расположением от-верстий под заклепки.

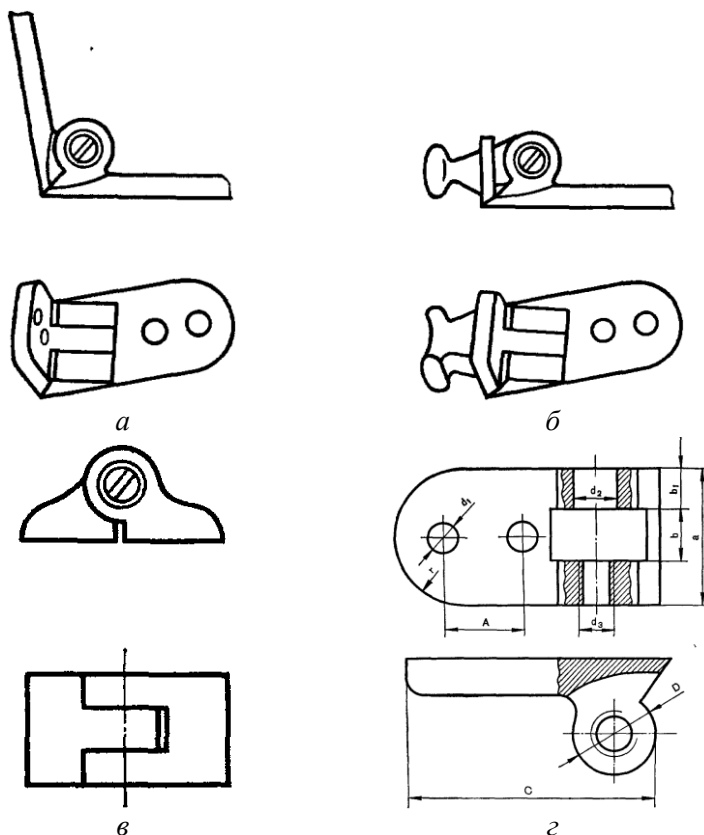


Рис. 3.5. Конструкция шарниров для оправы корригирующих очков: *а* – накладной шарнир с креплением под заклепки; *б* – гарпунный шарнир; *в* – накладной шарнир с креплением сваркой или пайкой; *г* – створки накладных шарниров

Шарниры изготавливаются из фасонных профилей с заданной формой. Заготовку шарнира получают из профиля методом фрезерования

на автоматах, использующих как исходный материал прутковые заготовки либо бухты. Полученные заготовки шарниров поступают на сверлильные автоматы, где выполняются операции сверления, зенкования и нарезания резьбы. После операции сверления шарниры проходят операцию галтовки для снятия заусенцев. Галтовку производят либо в небольших барабанах, либо в вибробункерах с применением в качестве обрабатываемого материала керамических элементов.

Детали, получаемые методом точения. Винты, штифты и другие подобные детали изготавливаются из круглого профиля на токарных автоматах. Исключение составляют детали типа «блока замыкания», заготавливаемые из пруткового фасонного профиля.

Токарные автоматы позволяют производить операции фрезерования шлица на винтах, нарезания внутренних и наружных резьб, сверления отверстий, точения по наружному контуру и отрезания деталей. Часто вместо обычных метчиков и плашек применяют накатные, что способствует экономии металла и повышению качества нарезаемых резьб. Для контроля изделий применяют профильные проекторы, позволяющие получить 10-, 20- и 50-кратное увеличение изображения детали, а также проходные и не проходные резьбовые калибры для определения качества нарезаемой резьбы.

Технология изготовления ободков. От точности изготовления данной детали зависит точность изготовления самой очковой оправы.

Фасонный профиль в процессе изготовления наматывается на катушку, вместе с которой он затем поступает на навивку ободков. С установленной на автомате катушки профиль подается на рабочий орган (ролик), связанный через коромысло с копиром. Копир вращается синхронно с подачей профиля, в результате чего происходит гибка роликом ободка. После одного оборота калибра подача приостанавливается, происходит отрезка фрезой ободка, и операция повторяется снова. Далее детали проходят обезжиривание, т. е. очистку от масел и эмульсий, применяемых для их охлаждения при обработке, и поступают на контроль, который осуществляется по профильному калибру визуально: определяется насколько плотно и без зазоров ободок садится на профильный калибр.

Как правило, изготовленная партия имеет одинаковые размеры и желательно, чтобы в дальнейшем она не перемешалась с другими партиями вплоть до изготовления оправы.

Технология изготовления угольников. Угольники металлической очковой оправы могут изготавливаться двумя способами:

- 1) совместно с заушником и с последующей отрезкой;
- 2) самостоятельно из круглого профиля или листа.

При втором варианте заготовкой для получения детали угольника могут служить: круглый профиль, отрезанный в штампе на заданную длину, или листовая заготовка заданных размеров.

Заготовка, прошедшая контроль (проверка на отсутствие раковин, трещин и закатов), поступает на операцию чеканки, где металл принимает контуры оснастки. Избыточный материал вытекает. Далее заготовка поступает на вырубку, где на эксцентриковых прессах в штампах вырубает деталь по отчеканенному контуру. После вырубки осуществляются отделочные операции – галтовка в барабанах с деревянными наполнителями и пастой и галтовка в металлических шариках для снятия заусенцев, возникающих после обработки, и повышения чистоты поверхности обрабатываемых деталей. Если левый и правый угольники изготавливаются совместно, то после галтовки в барабанах с деревянными наполнителями детали поступают на разрезку, осуществляемую на фрезерных станках, а затем на галтовку в шариках для снятия возникших заусенцев. При проверке изготовления деталей контролируют только размеры, в соответствии с которыми угольник соединяется с заушником.

Технология изготовления заушников. Проволоку круглого сечения в отожженном состоянии рубят на заготовки и редуцируют. Далее заготовки подают на операцию чеканки, после чего заготовка заушников проходит операции отрезки технологических концов на фрезерных полуавтоматах и заострения конца на редуцировочной машине, а затем проходят полирование на полировальных автоматах для повышения качества их поверхности.

Технология изготовления перемычек. Один из видов технологического процесса – изготовление перемычек из фасонных профилей с последующей рубкой по размеру, гибкой и фрезерованием мест пайки.

Другой вид технологического процесса практически идентичен описанному в разделе изготовления угольников методом чеканки.

Технология изготовления держателей носовых упоров. Держатели носовых упоров изготавливаются из ленты вырубкой на эксцентриковом прессе с последующей галтовкой для снятия заусен-

цев. Контроль ведется по внешнему виду и отсутствию заусенцев, все размеры выдерживаются оснасткой.

3.2.2. Сборка металлических очковых оправ

Для пайки очковых оправ применяют твердые припои типа ПСР (серебросодержащие). Температура плавления у припоя ПСР45 – 720 °С и у ПСР40 – 670 °С.

Нагрев при пайке твердыми припоями может производиться газовой горелкой или высокочастотной установкой. Пайка деталей и узлов очковых оправ при серийном и крупносерийном производстве осуществляется двумя методами: индукционной пайкой токами высокой частоты и контактной пайкой.

Сварочные соединения при сборке очковых оправ получают методом контактной электросварки.

3.2.3. Окончательная сборка металлических очковых оправ

Сборка металлических очковых оправ осуществляется по узлам. Основными узловыми соединениями являются:

- шарнир в сборе;
- ободок в сборе;
- рамка в сборе;
- заушник в сборе;
- оправка в сборе.

Сборка шарниров осуществляется посредством резьбового соединения вручную или с применением полуавтоматов, которые производят сборку и раскернивание шарниров.

Ободок в сборе состоит из ободка и блока замыкания, соединенных при помощи контактной пайки. Далее ободок проходит операцию гибки менисковой кривизны по радиусу. Операцию выполняют на настольном пневматическом прессе.

Рамка в сборе получается в результате припайки перемычек. Перемычки, как правило, паяют индукционной пайкой. После пайки перемычек переходят к пайке держателей носовых упоров.

После сборки рамка поступает на операцию разрезки блоков замыкания, которая производится двумя фрезами на полуавтомате.

Для получения заушника в сборе первый шарнир приваривают контактной сваркой к заушнику, а второй – к угольнику. После этого заушник поступает на операцию гибки угольника, которую производят на настольном пневматическом прессе. Проводить гибку рекомендуется одновременно правого и левого заушника, что исключает возникновение разности угла загиба при переналадках.

Предварительная сборка оправы. К рамке в сборе припаивают контактной пайкой заушник в сборе. Далее оправа поступает на операцию закручивания винта, с помощью винто-закручивающих полуавтоматов. Далее оправа поступает на подготовку поверхности к нанесению гальвано- или лакопокрытий. Отделочные операции производят на полировальных станках кругами из бязи или шлифовальными пенопластовыми кругами с зернами величиной не более № 6. После проведения подготовки к покрытию и самого покрытия оправа поступает на окончательную сборку, которая включает сборку наконечников и носовых упоров, загибку наконечников и маркировку оправы. Для повышения эластичности наконечников перед надеванием и загибкой их нагревают под лампами инфракрасного излучения или под фенами.

Маркировку оправы производят методом тампонажной печати. После сборки оправа проходит рихтовку, как и пластмассовые оправы.

3.2.4. Сборка и юстировка очков

Перед сборкой очков сверяют соответствие модели оправы и линз прописи на пакете-заказе, проверяют качество оправы, а также соответствие размеров оправы фасетированным линзам. Линзы не должны иметь на краях сколов, трещин, точек, пузырей, видимых невооруженным глазом.

Дефекты (за исключением трещин), которые закрываются при сборке ободками оправы, допускаются. После сборки производят юстировку очков.

В ободковой металлической оправе вначале при необходимости выгибают ободки оправы, отвинчивают колодочку ободка, затем вставляют фасетированную линзу в ободок и затягивают без чрезмерного усилия, чтобы исключить образование трещин, колодочку ободка винтом.

В безободковых металлических оправках сначала вывинчивают крепежные винты, затем устанавливают линзы по отверстиям и закрепляют их винтами. Между головкой винта и линзой предусматривают прокладку шайб: тонкой металлической (сразу после головки) и мягкой пластмассовой. Между стержнем винта и линзой помещают пластмассовую трубочку для предохранения линзы от трещин.

Проверка степени натяжения, возникающего в линзе из-за сильного механического сжатия при сборке в металлические оправы, производится на полярископе.

Варианты сборки в комбинированные оправы зависят от того, какой ободок имеет оправка – пластмассовый, металлический или оправка безободковая (крепление винтами). Некоторую специфику имеют очки, у которых крепление линз производится стяжкой капроновой нитью.

Юстировка очков. После сборки очков производят выправку оправы согласно требованиям ГОСТ 18491–73 и проверяют правильность установки линз относительно оправы. Фиксирование выправки пластмассовых оправ осуществляют в ванночке с холодной водой.

При сборке и выправке очков применяют набор специальных инструментов: тиски для выгибки ободка по радиусу, приспособление для натягивания капроновой нити, плоско- и круглогубцы, молоток с наковальней, отвертки, торцевой ключ, напильники и т. д. Эти инструменты необходимы также при ремонте очковых оправ.

3.3. Технология изготовления пластмассовых и комбинированных очковых оправ

3.3.1. Изготовление пластмассовых оправ методом механической обработки

Маршрут технологического процесса изготовления пластмассовой оправы методом механической обработки состоит из следующих операций:



Ацетатцеллюлозные листы рубят на заготовки, которые носят название *карты*. Предварительно лист обрезают по периметру, поскольку поступающие листы имеют большой разброс по размерам.

Обрезанный по периметру лист рубят на полосы, а их, в свою очередь, на карты, размеры которых определяются типоразмерами рамки и заушника. Припуски составляют 3–5 мм.

Затем две-три (бывает и больше) разные пластины склеивают вместе в определенных сочетаниях, что позволяет оправе «играть», изменяя свой тон и его насыщенность в зависимости от направления взгляда.

Потом начинается процесс фрезерования. Этот многостадийный процесс – порядка 10–30 операций. Основные из операций приведены в маршруте изготовления оправ. Для выполнения этих операций применяется целая гамма последовательно используемых станков. Для каждой фаски, каждого паза и отверстия, для обработки фронтальной и задней части оправы с приданием ей анатомической формы используются одношпиндельные станки, в которых обрабатываемая рамка вручную перемещается с позиции на позицию, и обработка ведется с помощью ручной подачи инструмента.

Более высокая точность и качество обработки фрезерованных оправ достигается на специальных обрабатывающих центрах (рис. 3.6) с числовым программным управлением. Эти центры построены по принципу перемещения обрабатываемой рамки относительно неподвижного шпинделя с вращающимся инструментом. В них рамка зажимается всего один раз и перемещается по пяти осям (три линейных перемещения и два вращения).

Вплавление шарниров производится между стадиями фрезерования с помощью установки ультразвукового вплавления.

На следующих стадиях – гибка рамки и гибка переносицы – нагретым оправам придается форма мениска в соответствии с эргономическими характеристиками. Здесь разогрев происходит с помощью токов высокой частоты.

Параллельно идет изготовление заушников.

Разрезанные на карточки определенных размеров заготовки, армируют на установке прострела (закладке армирующих стержней в заготовке заушников). Затем на фрезерно-копировальном станке фрезеруют контур заушника.



a



б

Рис. 3.6. Обрабатывающий центр, предназначенный для производства фрезерованных пластмассовых оправ:
a – фотография общего вида; *б* – фотография зоны обработки, включая шпиндели, а также приспособления для закрепления заготовки оправы

Механическую обработку деталей очковых оправ с целью устранения острых краев, придания им гладкой обтекаемой формы и глянца ведут в галтовочных барабанах с деревянными носителями, а также абразива (пемзы, стеклянного порошка и т. п.) и специального масла. Процесс обычно состоит из четырех-шести стадий.

1 стадия – грубая шлифовка осуществляется с помощью ромбовидных носителей, специального масла и сравнительно грубого пас-тообразного абразива; длительность 15–40 часов.

2 стадия – тонкая шлифовка. Частицы абразива более мелкие; длительность 15–40 часов.

3 стадию – полировку – проводят с использованием клиновидных носителей и абразива, по консистенции напоминающего сырковую массу. Длительность 30–60 часов.

4 стадия – промывка. После шлифовки и полировки заготовки промывают в специализированной ультразвуковой машине для удаления частиц грубого абразива.

5 стадия. На стадии глянцеваания абразив напоминает сливочный крем. Длительность 15–30 часов.

Только после этой стадии рамки и заушники приобретают глянец и блеск.

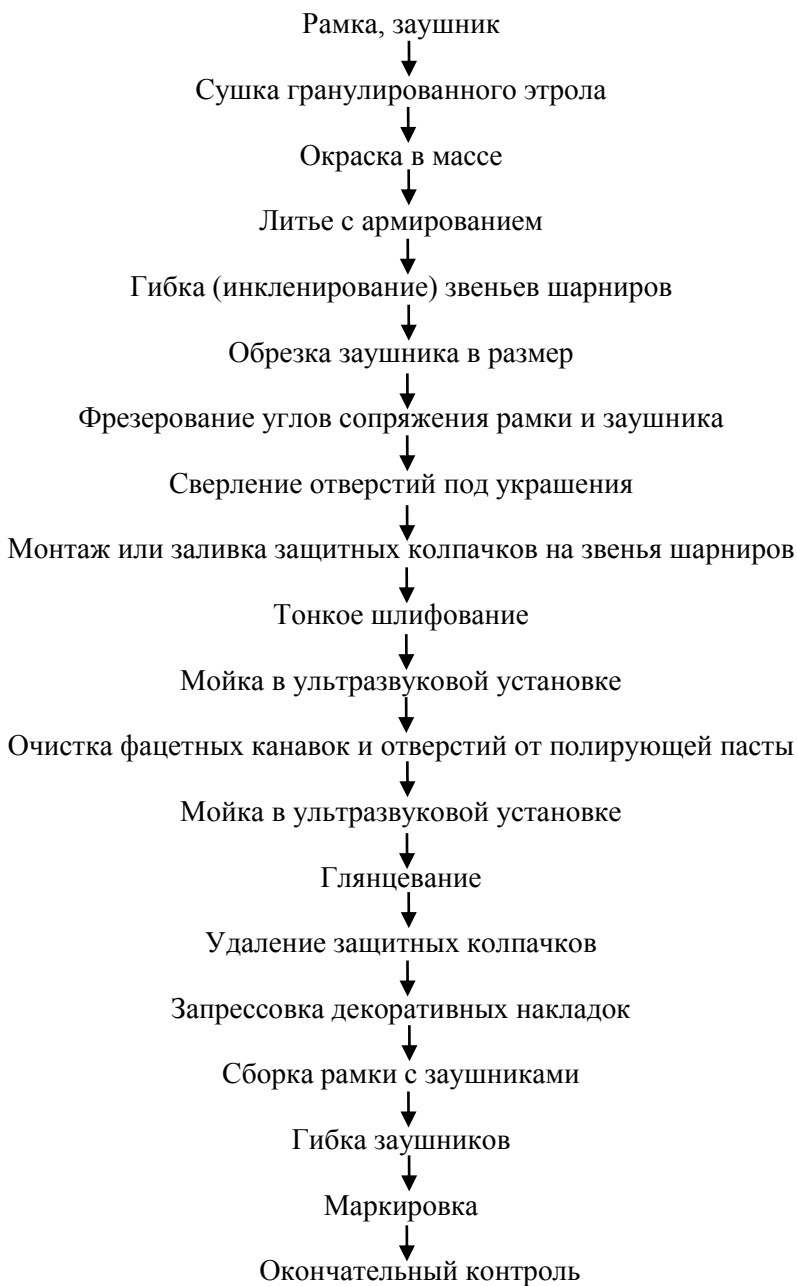
Далее обработанные детали поступают в сборочный цех, где производятся следующие операции:

- маркировка заушников, фальшстекол;
- вставка предварительно отфрезерованных фальшстекол в рамки оправ;
- подрезка заушников в соответствии с заданными ГОСТ углами;
- завинчивание (т. е. непосредственно сборка);
- загиб заушников;
- выправка;
- завершающий контроль, приемо-сдаточные и периодические испытания;
- упаковка

Контроль размеров рамки и заушника после операций фрезерования и установки шарниров проводят штангенциркулями, спецшаблонами и проектором. Качество поверхности контролируют визуально по эталонам шероховатости.

3.3.2. Изготовление пластмассовых оправ методом литья под давлением

Маршрут технологического процесса изготовления пластмассовой оправы методом литья под давлением состоит из следующих операций:



Выпускаемый химическими предприятиями ацетатцеллюлозный этрол имеет несколько базовых расцветок. Для увеличения цветовой гаммы литых оправ этрол проходит операцию окраски в массе. Для этого гранулы прозрачного или окрашенного в светлые тона материала смешивают с небольшим количеством гранул этрола интенсивного цвета. Изменение соотношения прозрачного и интенсивно окрашенного этрола позволяет получать широкую цветовую гамму.

Другой метод окраски в массе состоит в том, что прозрачный или светлоокрашенный материал смешивают непосредственно с пигментом и опудривают поверхность гранул. В дальнейшем при пластикации в цилиндре литьевой машины изделие приобретает необходимый цвет.

Гранулированный ацетатцеллюлозный этрол при хранении на складе сорбирует влагу из воздуха. При переработке это приводит к образованию пузырьков и помутнений в отливках. Поэтому перед литьем этрол сушат в термошкафу. Гранулированный материал насыпают в поддоны слоем 30–50 мм и помещают на полки термошкафа с температурой 80–100 °С на 6–8 часов.

При использовании вакуумных термошкафов продолжительность сушки сокращается до 3–4 ч.

Для литья пластмассовых деталей очковых оправ в пресс-формах используются экономичные термопластавтоматы с горизонтальным и вертикальным расположением инжекционного узла. Конструктивно пресс-формы для литья рамок и заушников состоят из постоянных унифицированных блоков и быстросъемных элементов, которые заменяются при переходе производства на новые модели очковых оправ.

Дальнейший технологический процесс изготовления очковых оправ из литых деталей не отличается от технологии изготовления фрезерованных оправ. Только продолжительность операций шлифования, полирования и глянцеваания сокращается в 1,2–2 раза.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ И ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ

4.1. Основные сведения о контактных линзах

В настоящее время в развитых странах около 10–15 % населения, нуждающегося в оптической коррекции недостатков зрения, пользуются линзами. Это число постоянно увеличивается в силу неоспоримых преимуществ перед очковой коррекцией.

Современные контактные линзы являются роговичными, т. е. одеваются на роговицу, и в зависимости от материала делятся на мягкие, жесткие газопроницаемые и занимающие промежуточное между ними положение – гибкие.

Наиболее широко применяются мягкие гидрофильные линзы, т. к. они отличаются простотой подбора и хорошей переносимостью. Чаще всего применяются линзы ежедневного ношения с содержанием воды примерно 38 %, которые требуют специальных средств хранения и ухода.

Традиционно жесткие контактные линзы изготавливаются из полиметилметакрилата (ПММА), а жесткие газопроницаемые линзы – из комбинации ПММА и кремнийорганических полимеров, хорошо пропускающих кислород. Они прочнее мягких линз и менее подвержены белковым отложениям. Жесткие линзы могут корректировать зрение с высоким астигматизмом и неправильной формой роговицы. Недостатком таких линз является то, что они требуют индивидуального подбора и изготовления.

Гибкие линзы изготавливаются из пластмасс типа силиконовой резины. Они обладают некоторыми свойствами мягких (простота подбора готовых линз, хорошая переносимость) и жестких (длительность эксплуатации) линз. В отличие от мягких они позволяют корректировать значительные степени астигматизма и неправильную форму роговицы.

На рис. 4.1 показано сечение контактной линзы и указаны ее основные геометрические параметры.

Геометрия задней поверхности линзы в значительной степени влияет на характер посадки на роговицу. В связи с тем, что роговица постепенно уплощается к периферии, для достижения оптимального соответствия между линзой и роговицей в линзе следует де-

лать постепенный переход к более плоской форме. Как правило, это достигается созданием конструкций с одной или несколькими более плоскими периферическими поверхностями.

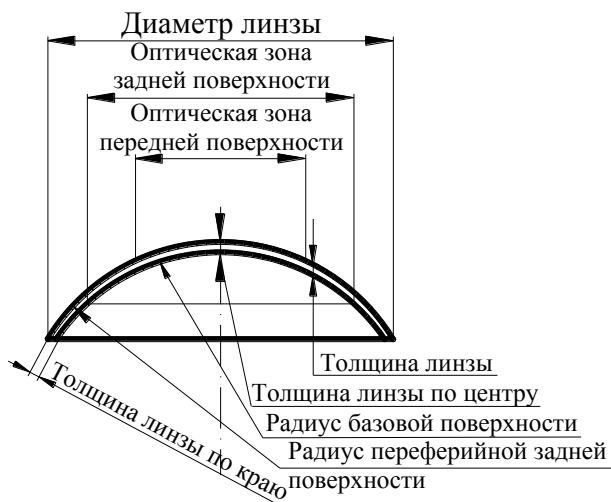


Рис. 4.1. Сечение контактной линзы и ее основные геометрические параметры

Оптическая зона задней поверхности – это центральная часть задней поверхности линзы, которая имеет форму круга, а ее размер определяет величину части линзы, используемой для получения изображения. Оптическая зона должна быть больше зрачка глаза. Так размер оптической зоны для типичной твердой линзы находится в пределах 7–9 мм, а для типичной мягкой – 7–13,5 мм.

Оптическая зона передней поверхности – это центральная оптическая часть передней поверхности лентикулярной линзы, ее размер лежит в пределах 7,5–10,5 мм.

Диаметр линзы обычно составляет 13–15 мм для типичной мягкой линзы и 8–10 мм для жесткой линзы. От диаметра зависят посадка и удобство ношения линзы.

Радиус периферической кривой задней поверхности может характеризоваться одним или несколькими значениями.

Ширина периферической кривой – это ширина периферической части задней поверхности линзы, которую называют также зоной скольжения контактной линзы.

Высота сегмента – это расстояние между плоскостью, касательной к наружным краям линзы и вершиной задней поверхности. Чем меньше радиус базовой кривизны, тем больше высота сегмента.

Толщина линзы по центру составляет обычно 0,035–0,5 мм для мягких линз и 0,10–0,12 мм для жестких линз.

Толщина линзы по краю составляет, как правило, 0,01–0,12 мм для мягких линз и 0,08–0,12 мм для жестких линз.

Конфигурацией края определяется удобство ношения и обращения с линзой.

В зависимости от профиля преломляющих поверхностей в оптической зоне контактные линзы можно разделить на четыре основных типа.

- **линзы с двумя сферическими поверхностями** применяются для коррекции сферической аметропии. При коррекции миопии радиус первой поверхности больше радиуса второй, а при коррекции гиперметропии – радиус первой поверхности меньше радиуса второй;

- **линзы со сферической задней и торической передней поверхностью** применяются для коррекции остаточного астигматизма, когда имеется нейтрализация хрусталикового и роговичного астигматизма (последний не выше 2 дптр). Контактная линза нейтрализует роговичный астигматизм, при этом начинает проявляться хрусталиковый астигматизм, который и корригируется торической поверхностью контактной линзы;

- **линзы с торической задней и сферической передней поверхностью** применяются при роговичном астигматизме глаза;

- **линзы с обеими торическими поверхностями.** При контактной коррекции астигматизма необходимо обеспечить ориентацию линзы в соответствии с положением главных сечений астигматического глаза. Линзы с задней торической поверхностью, используемые при значительной величине роговичного астигматизма, удерживаются в требуемом положении и не вращаются именно благодаря асферичности роговицы и задней поверхности линзы. Если базовая поверхность сферическая, то для удержания линзы создается балласт либо в виде призматического утолщения в нижней части линзы, либо включением металлической добавки в нижнюю часть линзы (рис. 4.2).

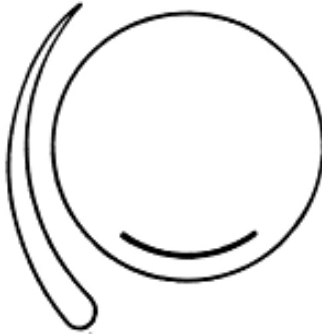


Рис. 4.2. Балласт в астигматических контактных линзах

Форма периферийной зоны контактной линзы определяется формой роговицы и удобством ношения. Необходимо, чтобы линза не оказывала давления на эпителий роговицы и не вызывала его травматизацию, поэтому форма базовой (задней) поверхности линзы на периферии за пределами оптической зоны является асферической, имея в среднем меньшую кривизну, чем в оптической зоне. Различают линзы с двойной, тройной и множественной кривизной задней поверхности (рис. 4.3).

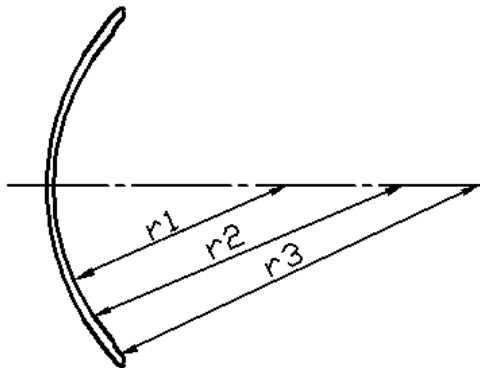


Рис. 4.3. Профиль базовой поверхности контактной линзы характеризуется двойной, тройной или множественной кривизной

Передней поверхности периферийной зоны придают такую форму, чтобы получить примерно равную толщину на всей периферийной зоне. Особое внимание уделяется конфигурации края контактной линзы: тонкий пологий край повышает комфортность ношения.

Первые контактные линзы были предназначены для коррекции миопии, затем были созданы линзы с положительной рефракцией и бифокальные. Коррекция пресбиопии с помощью контактных линз наиболее сложна. В контактной линзе, как и в обычной бифокальной очковой линзе, выполняются две оптические зоны с различной рефракцией. Известны и контактные линзы, в которых центральная круговая зона, предназначенная для зрения вдаль, окружена кольцевой зоной с более высокой рефракцией. На рис. 4.4, а, 4.4, в положение контактных линз соответствует зрению вдаль, а 4.4, б, 4.4, г – зрению вблизи. Для правильного расположения линзы применяется различного вида балласт.

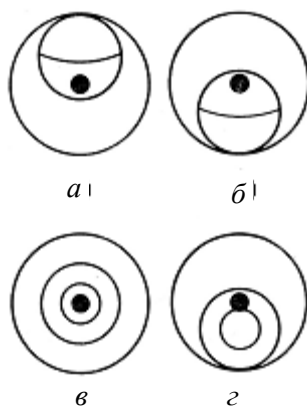


Рис. 4.4. Бифокальные контактные линзы

4.2. Требования, предъявляемые к материалам контактных линз

Материалы для изготовления контактных линз делятся на три группы в зависимости от **содержания в них воды**:

С низким содержанием воды	до 45 %
Со средним содержанием воды	45–60 %
С высоким содержанием воды	более 65 %

Следует отметить, что, чем больше содержание воды, тем, как правило, ниже прочность линзы. Жесткие материалы, такие как ПММА, обычно поглощают менее 2 % воды, чем и обусловлена их жесткость.

Линзы из материала с низким содержанием воды рекомендуют использовать при рефракции от -1 до -5 дптр. Эти материалы совместимы со всеми способами ухода за контактными линзами, включая тепловую обработку, обработку перекисью водорода, химическими дезинфектантами. Такие материалы поглощают мало белка, что удлиняет срок их службы. Линзы из такого материала имеют повышенную прочность на разрыв по сравнению с линзами из материала с высоким содержанием воды. Поскольку материалы с низким содержанием воды не поглощают консерванты, то не возникает проблем с обесцвечиванием, как у материалов с высоким содержанием воды. Линзы из материалов с низким содержанием воды могут изготавливаться токарной обработкой, литьем в форму и центробежным литьем.

Линзы из материалов с высоким содержанием воды имеют большую кислородную проницаемость и поэтому оптимальнее подходят для изготовления линз больших рефракций, как положительных, так и отрицательных. Линзы из таких материалов имеют более низкую прочность на растяжение. Эти материалы также отличаются худшей совместимостью с дезинфицирующими средствами. Материалы с высоким содержанием воды склонны к поглощению протеина. Это способствует сокращению срока службы таких линз. Контактные линзы с высоким содержанием воды обычно изготавливаются токарной обработкой или литьем.

Линзы из материалов со средним содержанием воды разрабатываются с целью соединить в них преимущества материалов с низким и высоким содержанием воды. Обычно такие материалы имеют хорошие физиологические параметры, позволяют изготавливать тонкие удобные линзы. Недостатком материалов со средним содержанием воды является повышенное поглощение белка.

Показатель преломления линзы зависит от материала и находится в диапазоне между $1,33$ и $1,55$. Материал с высоким влагосодержанием обычно имеет более низкий показатель преломления. Линза из такого материала имеет большую толщину, чем линза равной оптической силы, но изготовленная из материала с меньшим содержанием воды.

Оптические свойства линзы должны быть стабильными.

Прочность линзы при растяжении определяется материалом и толщиной линзы. Прочность линз из материалов с высоким влаго-содержанием, как правило, ниже.

Кислородные характеристики линзы определяют физиологическую совместимость линзы с роговицей. Характеризуются кислородной проницаемостью DK или DK/L или эквивалентной кислородной характеристикой.

Кислородопроницаемость определяется отношением объема кислорода, прошедшего через единицу площади контактной линзы за единицу времени, обозначается DK (встречаются обозначения dK или Dk) и измеряется в $\text{см}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$. Увеличение диффузии кислорода через контактную линзу достигается путем уменьшения ее толщины, увеличения влагосодержания материала и создания новых материалов с повышенным коэффициентом диффузии кислорода.

Поэтому для характеристики кислородопроницаемости часто используют величину DK/L (или dK/t , где $L(t)$ – толщина линзы в см. Может оказаться так, что более толстые высокогидрофильные линзы и более тонкие линзы низкого влагосодержания обеспечивают одинаковое поступление кислорода к роговице глаза.

Для характеристики доступности кислорода к роговице применяют еще один показатель – **эквивалентную кислородную характеристику**. Как известно, в воздухе содержится около 21 % кислорода. Поэтому значение эквивалентной кислородной характеристики при отсутствии линзы на глазу принято 21 %. При ношении линзы эта характеристика может снижаться до 4 %. Измерения проводятся на живом глазу путем размещения на роговице датчика с кислородной камерой.

К числу важных характеристик материалов и собственно контактных линз относятся также биосовместимость, нетоксичность, устойчивость к раздражению микроорганизмов, устойчивость к образованию белковых отложений, смачиваемость (для жестких линз), легкость в обращении и легкость очистки и дезинфекции.

В частности, при разработке материала тщательно проверяется его способность поглощать белок. Обычно материалы с высоким содержанием воды адсорбируют больше белка, чем материалы с низким содержанием воды, ионные материалы – больше, чем неионные. Неионные материалы с низким содержанием воды (полимакон, например) меньше других поглощают белок. Белковый осадок на по-

верхности контактной линзы приводит к клиническим расстройствам (покраснению глаз, конъюнктивитам, ухудшению зрения и т. д.)

В настоящее время мягкие контактные линзы выпускают как неокрашенными (прозрачными), так и окрашенными. Линзы могут быть лишь слегка подкрашены, что делает процедуру обращения с ними более удобной. Линзы могут быть окрашены более интенсивно для усиления естественного цвета глаз или придания глазам особой выразительности (такие линзы применяют, в основном, пациенты со светлыми глазами). Линзы могут также иметь интенсивную окраску (делающую их полностью непрозрачными вне области зрачка), способную кардинально изменять естественный цвет глаз (причем, как светлых, так и самых темных).

4.3. Технология изготовления жестких контактных линз

Основным методом формообразования таких линз является механическая обработка, включающая точение и последующее полирование их поверхностей. Технологический процесс состоит из следующих основных этапов: заготовительного; точения вогнутой поверхности линзы; ее полирования; точения выпуклой поверхности; ее полирования; контроля качества оптики; обработки края, окончательного контроля линзы и гравирования.

Заготовительный этап. Для изготовления жестких контактных линз используются цилиндрические заготовки из полиметилметакрилата диаметром 12–12,5 мм и толщиной 4–5 мм. Заготовки таких размеров получают из листового материала путем их высверливания с помощью трубчатых инструментов. На этом же этапе для снятия внутренних напряжений осуществляют отжиг полученных заготовок. С этой целью их помещают в термошкаф, где они находятся в течение 8 ч при температуре 130–135 °С. Затем в течение последующих 8–10 ч температуру плавно снижают до комнатной.

Точение вогнутой поверхности. Предварительно с помощью специального наклеечного воскового материала заготовку наклеивают (блокируют) в центре нагретой стальной подложки – спутника. Затем спутник с наклеенной заготовкой закрепляется в цанге специального сферотокарного станка (КП61) для точения вогнутой поверхности линзы. Схема точения представлена на рис. 4.5.

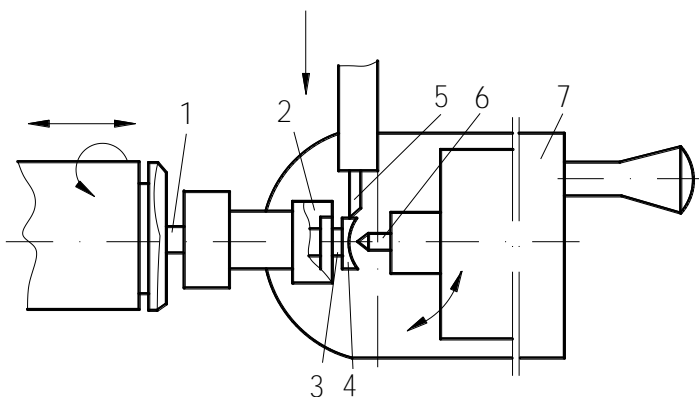


Рис. 4.5. Схема точения вогнутой поверхности линзы на станке КП61

Обработка контактной линзы начинается с протачивания заготовки до заданного диаметра с припуском 0,1 мм на формирование края. Для этого используется стальной резец 5, установленный на поперечном суппорте станка. Далее с помощью алмазного резца 6, установленного на поворотном суппорте 7, начинают обработку вогнутой поверхности заготовки 4. Последняя установлена на спутнике 3, закрепленном в цанговом патроне 2 внутри шлифовальной головки 1.

Точение начинают с поверхности большего радиуса, в ходе которого производят несколько последовательных проходов с глубиной резания 0,2 мм для черновой обработки и с глубиной резания 0,01 мм – для чистовой. После этого устанавливают требуемый радиус поворотного суппорта станка и осуществляют точение поверхности меньшего диаметра.

Полирование вогнутой поверхности. Эта операция начинается с полирования оптической зоны линзы. Сначала подготавливают к работе соответствующий полировальник. Для этого отлитую заготовку воскового полировальника устанавливают на сферотокарный станок КП62 (для обработки выпуклых поверхностей), на котором протачивают рабочую поверхность полировальника требуемого радиуса. Изготовленный притир-копировальник 2 (рис. 4.6) устанавливают на нижний шпиндель 7 доводочного станка. Приклеенную к спутнику 4 заготовку линзы 3 помещают на притир и удерживают поводком 5 верхнего шпинделя 6. Последнему помимо вращательного сообщается возвратно-качательное движение.

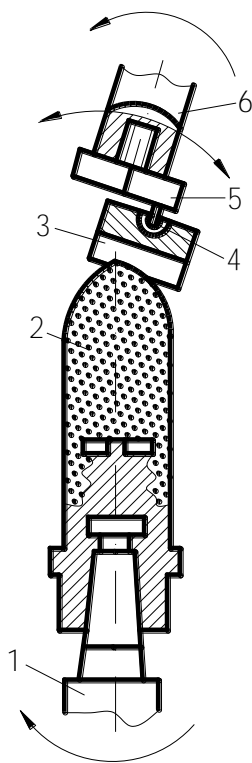


Рис. 4.6. Схема полирования вогнутой поверхности заготовки линзы

Полирование производится в течение 1–2 мин с применением полирующей суспензии. Периферийные зоны заготовки линзы полируют на вертикально шпиндельном станке с помощью специально изготовленных грибков, обтянутых медицинским лейкопластырем. Выбор радиуса соответствующего грибка производится с учетом толщины пластыря.

Точение выпуклой стороны. На предварительно нагретую оправку с центральным отверстием и радиусом, соответствующим радиусу оптической зоны заготовки, наносят наклейный воск и приклеивают заготовку со стороны обработанной вогнутой поверхности. С помощью специального приспособления заготовку центрируют на оправке с точностью 0,02–0,04 мм. После остывания оправку с отцентрированной на ней заготовкой линзы устанавливают на

посадочный конус сферотокарного станка КП62 для обработки выпуклой поверхности. Точение также осуществляется за несколько проходов (аналогично обработке вогнутой поверхности) до тех пор, пока в центре линзы будет достигнута заданная толщина, которая контролируется толщиномером.

Полирование выпуклой поверхности. Для этого вначале на сферотокарном станке КП61 протачивают рабочую поверхность заготовленного притира полировальника, радиус рабочей поверхности которого соответствует кривизне оптической зоны выпуклой поверхности линзы. Полирование этой поверхности производят на доводочном станке КП65 с применением полирующей суспензии (рис. 4.7).

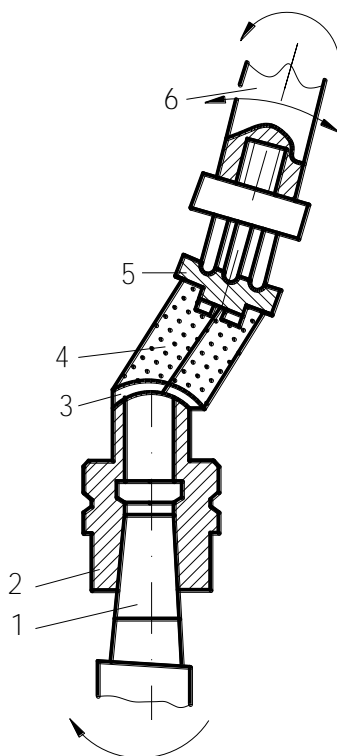


Рис. 4.7. Схема полирования выпуклой поверхности заготовки линзы

Оправку 2 с наклеенной заготовкой 3 устанавливают на конус нижнего шпинделя 1 доводочного станка. На выпуклую поверхность

линзы помещают притир-полировальник 4, смоченный полирующей суспензией. Три штыря-поводка 5 верхнего шпинделя 6 фиксируют в лунках подложки притира. В процессе обработки верхнему шпинделю помимо вращательного сообщается возвратно-качательное движение. Продолжается полирование 1–2 мин.

Обработка края. Эту операцию выполняют на специальном станке КП63, предназначенном для обработки края контактных линз.

Обрабатываемую заготовку 1 (рис. 4.8) центрируют и приклеивают выпуклой стороной к специальному спутнику 2 с помощью наклеенного воска. При этом диаметр спутника меньше общего диаметра линзы на величину выхода резца 4 при обработке переходной конической поверхности на выпуклую поверхность линзы, обрабатываемую режущей кромкой резца. Поперечный суппорт 3 устанавливают таким образом, чтобы при обработке края получился необходимый диаметр линзы.

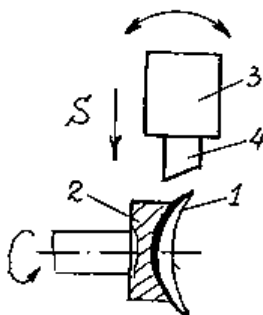


Рис. 4.8. Схема обработки края линзы на станке КП63

Резец подводят к кромке линзы до касания под углом, обеспечивающим плавный переход внутренней поверхности к радиусу закругления. Далее поворотом суппорта край линзы закругляется и обрабатывается конус со стороны выпуклой поверхности линзы. Обработку осуществляют под микроскопом.

После формирования края на вертикально шпиндельном станке или на шпинделе станка КП63 производят полирование края линзы фетром, смоченным полирующей суспензией.

Гравирование контактных линз. При необходимости линзы гравировать. Для этого на ее наружной поверхности на расстоянии 0,5 мм от края при помощи специального гравировального устрой-

ства алмазной иглой наносят цифры, знаки, буквы, обозначающие геометрические и оптические параметры линзы.

4.4. Технология изготовления мягких контактных линз

Изготовление мягких контактных линз осуществляется на том же оборудовании, что и обработка жестких контактных линз. Однако имеется ряд специфических особенностей.

Во-первых, для изготовления мягких линз применяют высушенные цилиндрические заготовки диаметром $15 \pm 0,1$ мм и толщиной 5–6 мм. Высушенный гидрофильный материал в целях сохранения стабильности основных свойств должен содержаться в герметично закрытых футлярах-контейнерах.

При производстве мягких контактных линз необходимо поддерживать в рабочем помещении постоянную температуру (22 ± 2 °С) и влажность (45 ± 5 %) воздуха, что достигается установкой кондиционеров и вытяжек при закрытых дверях и окнах. Соблюдение этих условий является обязательным, т. к. гидрофильный материал адсорбирует воду из атмосферы помещения, набухает и изменяет свои свойства.

Во-вторых, линзы обрабатываются в сухом состоянии, а затем подвергаются гидратации. При этом размеры линз в сухом состоянии и гидратированном существенно различны. Поэтому перед обработкой рассчитывают оптические и геометрические параметры линзы в жестком (сухом) состоянии, исходя из заданных параметров линз в мягком гидратированном состоянии.

В-третьих, окончательный контроль готовых мягких контактных линз в гидратированном состоянии проводят в жидкой среде в недеформированном виде.

Формообразование заготовок в твердом состоянии, т. е. точение и полирования их поверхностей осуществляется таким же образом, как и для жестких линз.

После обработки и контроля линз в твердом состоянии их тщательно очищают и помещают в контейнер с физиологическим раствором и выдерживают там до полного набухания в течение 48 ч. После гидратации производят контроль геометрических и оптических параметров линзы в мягком состоянии.

Дезинфекцию проводят в течение 20 мин в 10 %-м растворе перекиси водорода. Затем гидратированные линзы тщательно очищают и упаковывают.

4.5. Технология изготовления интраокулярных линз

4.5.1. Основные сведения об интраокулярных линзах

Ежегодно в мире проводится более 3 млн операций по замене хрусталика глаза, помутневшего в результате катаракты, на искусственную (интраокулярную) линзу. Катаракта – это помутнение естественного хрусталика в глазу. Хрусталик располагается за радужкой и работает как линза в фотоаппарате, т. е. фокусирует изображение предметов на сетчатке. Из-за катаракты яркие цвета тускнеют, изображения предметов становятся размытыми, резко ухудшается зрение в темноте. На рис. 4.9, *а* показан глаз с прозрачным хрусталиком, а на рис. 4.9, *б* – глаз с помутневшим хрусталиком (катаракта).

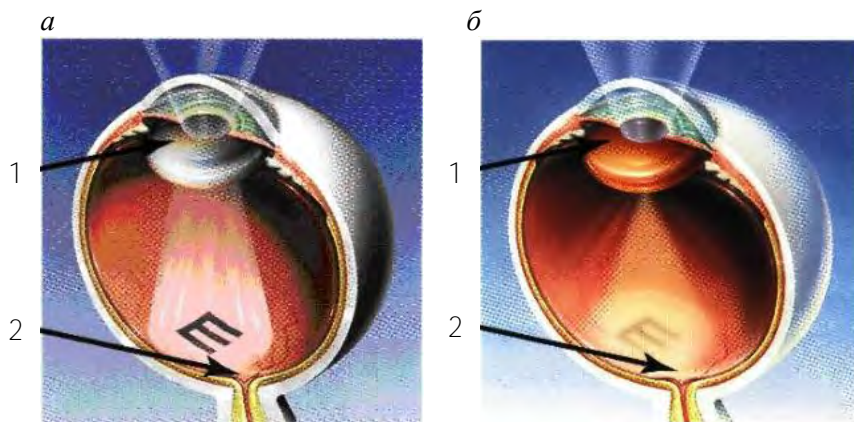


Рис. 4.9. Изображение на сетчатке глаза:

а – с прозрачным хрусталиком; *б* – с помутневшим хрусталиком.

1 – хрусталик, 2 – изображение на сетчатке глаза

Человеческий хрусталик состоит в основном из белков и воды и может мутнеть до такой степени, что препятствует прохождению света и, как следствие, формированию изображения на сетчатке. Такие помутнения хрусталика могут развиваться после ранений гла-

за, различных заболеваний и даже действия некоторых лекарств. Но в 90 % случаев помутнение вызвано возрастными изменениями. Следует особо подчеркнуть, что катаракта – это не пленка на глазу и ее нельзя убрать с помощью диеты, пищевых добавок или лазерного лечения. Лучший и признанный во всем мире способ лечения катаракты – удаление старого, помутневшего хрусталика и замена его искусственным.

Операции по удалению хрусталика специальной иглой делали 500 лет до нашей эры, что подтверждается найденным манускриптом, в котором описана такая операция и возникающие при ней осложнения. Научная медицина долгое время дистанцировалась от проведения таких операций, и их выполняли «бродячие хирурги». Один из них, Тэйлор, сделал операции композиторам Генделю и Баху, в результате чего они ослепли.

В 1745 г. французский хирург Жак Диваль разработал способ удаления хрусталика с помощью полый иглы. В настоящее время для лечения катаракты применяются ультразвуковая факэмульсификация, т. е. механическое дробление содержимого хрусталика трубчатым инструментом, совершающим ультразвуковые колебания, и технология, основанная на разрушении хрусталика импульсной струей жидкости высокого давления.

Первая имплантация интраокулярной линзы была выполнена в 1949 г. Гарольдом Ридли в Лондоне. В дальнейшем такие операции стали широко использоваться в микрохирургии глаза, во многом благодаря вкладу академика С.Н. Федорова, который изучал вопросы имплантации интраокулярных линз начиная с 1958 г.

Идея создания искусственного хрусталика возникла у Г. Ридли на основе результатов обследования пилотов, получивших ранение глаз во время Второй мировой войны. Он обратил внимание, что осколки пластмассы, из которой изготавливался колпак кабины самолета, попав в глаз пилота, не вызывали никаких побочных эффектов. Учитывая это, Г. Ридли предложил изготавливать искусственный хрусталик из полиметилметакрилата (ПММА).

Интраокулярная линза должна обеспечивать возможность аккомодации, т. е. фокусировки на сетчатку как ближних, так и дальних объектов. Если она будет иметь фиксированное фокусное расстояние (монофокальная линза), то она будет обеспечивать качественное изображение лишь для ближних или дальних предметов. предпри-

нимались попытки решить эту проблему путем имплантации в правый и левый глаз монофокальных линз с различным фокусным расстоянием, однако в результате такой операции возникали существенные нарушения стереоскопичности зрения. Более рациональным оказалось деление линзы на кольцевые зоны с различной оптической силой. Количество таких зон варьируется в промышленно-выпускаемых линзах от 2 до 7. При использовании мультизонных линз на сетчатке формируется одновременно несколько изображений, из которых мозг выбирает представляющее интерес, подавляя остальные. Качество изображения, формируемого мультизонными линзами, существенно зависит от диаметра зрачка. При ярком освещении зрачок сужается и остается лишь один фокус от центральной зоны линзы.

В начале 80-х гг. прошлого века были предложены дифракционно-рефракционные линзы, в которых эффект бифокальности достигался за счет дифракции светового потока на непрерывном микро-рельефе, обеспечивающем равные интенсивности нулевого и первого порядков дифракции. Чтобы получить такое распределение интенсивностей, скачок фазы между дифракционными зонами должен быть равен π . При показателе преломления, равном 1,5, это соответствует глубине микро-рельефа 1,6 мкм. По технологическим причинам создание таких линз долгое время оставалось затруднительным.

Первые дифракционно-рефракционные линзы, выпущенные в 1988 г., были имплантированы 20 тысячам пациентам. Они изготавливались из твердого полимера методом алмазного точения. На острых краях дифракционных зон со временем скапливались биологические отложения, что существенно ухудшало оптические свойства линзы. В современных линзах этот недостаток устраняется за счет их изготовления из гидрофобного материала (например, акрила или силикона). Кроме того, современные линзы изготавливаются из мягких материалов, что позволяет имплантировать их в глаз в свернутом состоянии через малые разрезы. В настоящее время существует около 1500 моделей интраокулярных линз, изготавливаемых 33 компаниями.

В формировании зрения главную роль играет не только хрусталик, но и глазное дно – сетчатка, на которой фокусируется изобра-

жение. Центр сетчатки занимает желтое пятно или макула. Именно эта структура отвечает за остроту зрения и цветоощущение.

Естественный хрусталик человека имеет собственный желтый фильтр, защищающий глазное дно от вредного воздействия ультрафиолетовых и синих лучей света, которые присутствуют в искусственном и естественном освещении. По данным последних исследований длительное воздействие синего цвета вызывает поражение сетчатки и макулы и приводит к появлению возрастной дегенерации макулы. Причем она не лечится и может стать причиной существенного снижения зрения и даже слепоты. С возрастом естественный хрусталик человека желтеет. Желтый цвет хрусталика выступает фильтром от синего цвета.

Заменяя помутневший хрусталик на интраокулярную линзу, мы удаляем желтый фильтр и снижаем защитное действие природных механизмов, что увеличивает риск развития возрастной дегенерации макулы. Поэтому идеальный искусственный хрусталик должен защищать сетчатку не только от ультрафиолетовых лучей, но и иметь желтый фильтр от синих лучей. По этой причине современные интраокулярные линзы изготавливаются желтого цвета. При этом количество желтого пигмента в линзе полностью соответствует природному хрусталику человека и не влияет на цветовосприятие.

Любая интраокулярная линза состоит из оптической части, служащей для формирования изображения, и гаптической части (гаптики), служащей для крепления линзы внутри глаза (рис. 4.10).

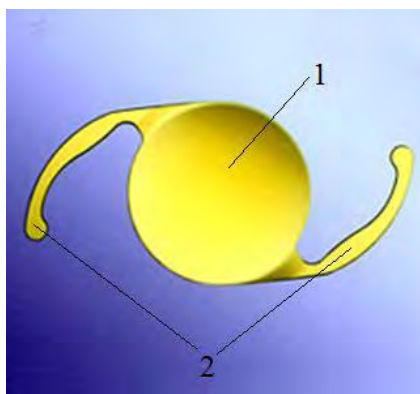


Рис. 4.10. Общий вид интраокулярной линзы:
1 – оптическая часть; 2 – гаптики

Различают сборные и монолитные интраокулярные линзы. Примером сборных интраокулярных линз являются линзы, гаптическая часть которых выполнена из полимерного волокна, например, полипропилена.

Возможность аккомодации может обеспечиваться за счет использования дифракционно-рефракционных интраокулярных линз и аккомодирующих линз, которые основаны на использовании естественных аккомодационных движений глаза. Аккомодирующие линзы можно разделить на однокомпонентные, содержащие один оптический элемент, и двухкомпонентные, содержащие два оптических элемента.

На рис. 4.11 представлена схема конструкции однокомпонентной аккомодирующей интраокулярной линзы.



Рис. 4.11. Схема конструкции однокомпонентной аккомодирующей интраокулярной линзы

Линза состоит из оптической части диаметром 4,5–5 мм, связанной с гапстикой в виде пластин, на которых непосредственно вблизи оптической части выполнены обеспечивающие шарнирное сочленение канавки. Глубина канавок составляет 50 % толщины пластины. На концах гаптики выполнены петли из полиимида, служащие для четырехточечной фиксации линзы внутри капсулярной сумки. Как показывают исследования, линза такой конструкции в большинстве случаев располагается после имплантации в задней части капсулярной сумки вблизи стекловидной (гиалиновой) мембраны (рис. 4.12).

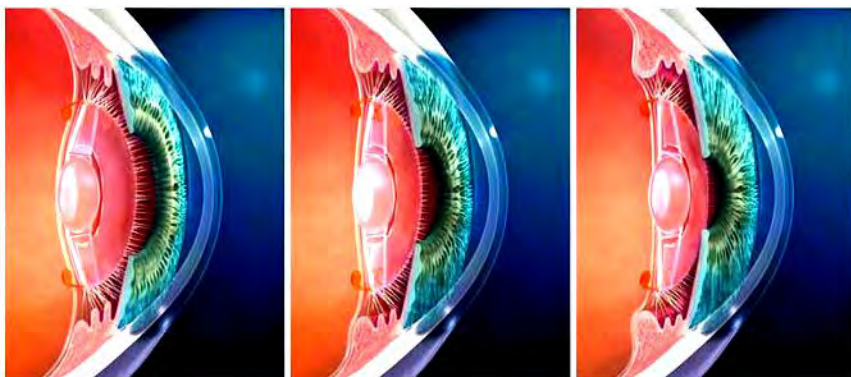


Рис. 4.12. Схема смещения линзы внутри глаза в процессе аккомодации

При сокращении мышц реснитчатого тела происходит перераспределение его массы, приводящее к увеличению давления стекловидного тела, которое вызывает перемещение линзы в переднем направлении.

Известна конструкция двухкомпонентной аккомодирующей интраокулярной линзы, состоящей из передней собирающей и задней рассеивающей линз, связанных посредством упругого элемента. Схема размещения такой линзы внутри глаза и процесса аккомодации представлены на рис. 4.13.

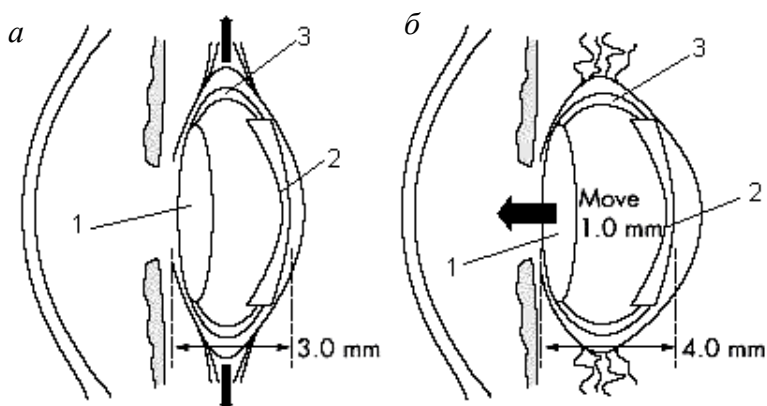


Рис. 4.13. Схема размещения двухкомпонентной линзы внутри глаза (а) и процесса аккомодации (б):

1 – передняя линза; 2 – задняя линза; 3 – упругий элемент

Передняя линза имеет большую положительную силу, значительно превышающую необходимую для достижения эметропии, а задняя – отрицательную силу, необходимую для возвращения глаза к эметропии. Расстояние между линзами составляет 4 мм. При имплантации линзы в капсулярную сумку натяжение волокон цинновой связки приводит к осевому укорочению сумки и сближению линз. При этом в упругом элементе, связывающем линзы между собой, запасается упругая энергия. При сокращении мышц ресниччатого тела, сопровождающем аккомодационное усилие, натяжение волокон ослабляется, что приводит к снижению натяжения капсулярной сумки и перемещению передней линзы в результате высвобождения запасенной в упругом элементе энергии.

Расчет показывает, что для однокомпонентной аккомодирующей линзы с оптической силой 19 дптр перемещение линзы в 1 мм будет приводить к изменению оптической силы глаза на 1,2 дптр. Для двухкомпонентной линзы с передним компонентом, имеющим оптическую силу +32 дптр, и задним компонентом, имеющим силу – 12 дптр, перемещение переднего компонента на 1 мм будет приводить к изменению оптической силы глаза на 2,2 дптр.

Описанные аккомодирующие линзы основаны на принципе псевдоаккомодации, т. е. на перемещении оптической части линзы или одного из ее оптических компонентов внутри глаза. Истинная аккомодация, реализующаяся в здоровом человеческом глазе, основана на изменении радиуса кривизны и оптической силы хрусталика. Подобный принцип реализуется в однокомпонентной аккомодирующей линзе (рис. 4.14).

Линза содержит оптическую часть в виде камеры, заполненной силиконовым гелем, диафрагму с отверстием и поршень. В сокращенном состоянии капсулярной сумки, соответствующем расслаблению глаза, поршень оказывает давление на камеру с гелем, что приводит к ее выпячиванию через отверстие в диафрагме. В этом состоянии оптическая часть имеет максимальную кривизну и оптическую силу. При расслаблении капсулярной сумки, сопровождающем аккомодационное усилие, давление на камеру с гелем уменьшается и происходит снижение кривизны и оптической силы оптической части. Описанный механизм аккомодации является в некотором смысле антифизиологичным, т. к. для нормального человеческого глаза аккомодационному усилию соответствует максимальная опти-

ческая сила. При использовании описанной линзы аккомодационное усилие должно сопровождать рассматривание удаленных предметов, а при рассматривании близко расположенных предметов должна происходить релаксация.

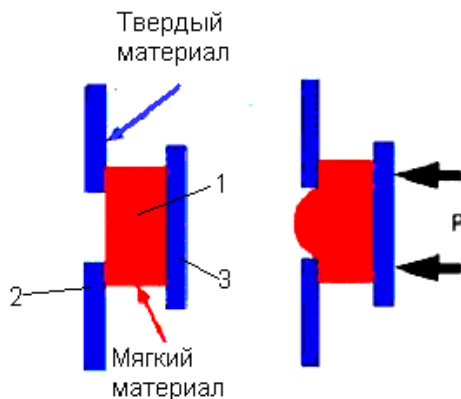


Рис. 4.14. Принцип действия однокомпонентной аккомодирующей линзы:
1 – оптическая часть; 2 – диафрагма; 3 – поршень

Эксперименты, проведенные на приматах, показывают возможность достаточно простой физиологической адаптации к подобному сценарию. Кроме того, разработан вариант конструкции линзы, в котором аккомодационное усилие приводит к увеличению оптической силы. Интересен тот факт, что сходный с описанным механизм аккомодации встречается в природе у водоплавающих птиц, глаз которых нуждается в широком диапазоне аккомодации для подводного плавания. Роль диафрагмы выполняет при этом жесткая радужная оболочка. Данная линза обладает самым широким диапазоном аккомодации из известных аккомодирующих линз. В экспериментах на приматах показана аккомодация более чем в 49 дптр. Диапазон аккомодации может контролироваться путем изменения диаметра отверстия в диафрагме и показателя преломления геля.

4.5.2. Способы изготовления интраокулярных линз

Интраокулярные линзы могут изготавливаться литьевым формованием, лазерным травлением и алмазным точением.

При использовании первого способа изготовления линзы производится путем литьевого формования в полости матрицы. Для изготовления матрицы на поверхность подложки из твердого материала наносится слой светочувствительного полимера (фоторезиста), который подвергается экспозиции импульсного лазерного излучения. Сканирование лазерного луча осуществляется путем его перемещения вдоль радиуса вращающейся с постоянной частотой круговой подложки. При этом линейная скорость вращения точки подложки, в которой производится экспозиция, увеличивается пропорционально радиальной координате этой точки. Это приводит к тому, что с увеличением радиальной координаты энергия импульса при его постоянной длительности распределяется на большем участке траектории, что вызывает уменьшение глубины экспозиции. Для устранения этого эффекта предлагается использовать частотную модуляцию лазерного излучения, а именно, изменять частоту следования импульсов пропорционально радиальной координате. Учитывая, что в этом случае становится невозможным получить требуемый профиль вблизи центра подложки, где радиальная координата стремится к нулю, в конструкцию линзы вводится центральная зона без дифракционного микрорельефа. Амплитуда импульсов P , необходимая для получения требуемой глубины экспозиции h , определяется зависимостью $P = f^{-1}(h)$, где f – характеристическая функция, описывающая зависимость глубины экспозиции от амплитуды импульсов и определяемая экспериментально. После экспозиции производится проявление фоторезиста, в результате которого растворяются экспонированные участки. Перенос сформированного рельефа на поверхность матрицы может производиться путем гальванического осаждения на поверхность фоторезиста слоя никеля или меди толщиной от 100 до 1000 мкм, который после отделения фиксируется на прочной подложке и образует вместе с ней полуматрицу. Перед помещением фоторезиста в гальваническую ванну на его поверхность предварительно напыляется тонкий токопроводящий слой. В другом способе в качестве матрицы используется сама подложка, на которую нанесен фоторезист. Для переноса рельефа с фоторезиста на подложку используется реактивное ионное травление.

Заготовки, полученные методом литьевого формования, могут подвергаться дальнейшей механической обработке (рис. 4.15).

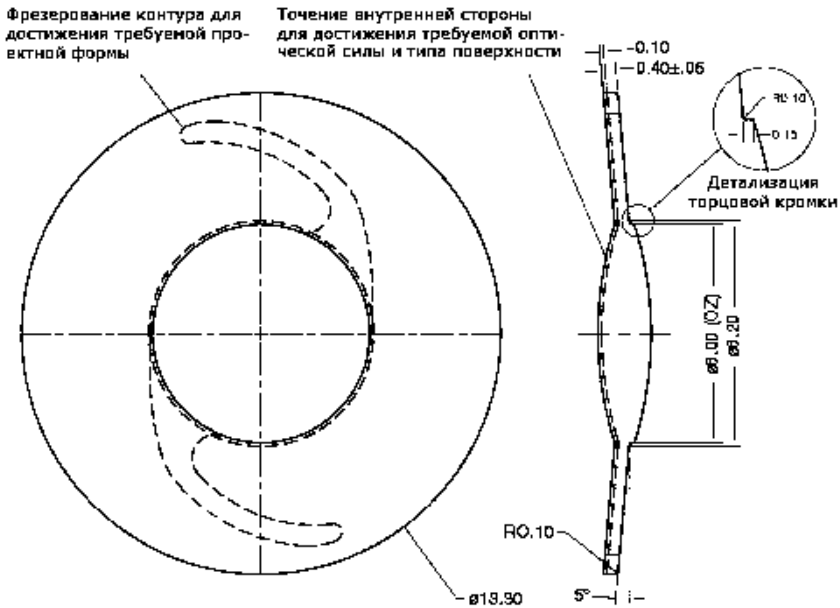


Рис. 4.15. Полученная литьевым формованием заготовка линзы и схема ее механической обработки

Механическая обработка состоит в алмазном точении задней поверхности, которое позволяет получить линзу с требуемой оптической силой, и алмазном фрезеровании контура оптической части и гаптики. Для обработки гидрофобных материалов используются так называемые криогенное точение и фрезерование, при которых температура заготовки поддерживается при обработке на уровне не выше $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, а заготовка крепится на специальной оправке с помощью влаги.

Обработка офтальмологических изделий и матриц для их формирования может производиться на прецизионных станках методом алмазного точения и методом точения летучим резцом (рис. 4.16).

При алмазном точении заготовка имеет вращательное движение, а управляемое перемещение инструмента относительно заготовки осуществляется с помощью направляющих, одна из которых может программируемым образом перемещаться вдоль оси X , а другая – вдоль оси Z . Ось Z параллельна оси вращения заготовки. Для боль-

шинства прецизионных станков характерно Т-образное расположение направляющих. В случае точения летучим резцом вращательное движение сообщается инструменту, а относительное перемещение заготовки и инструмента производится с помощью поворотного стола (B -ось) и линейных осей X и Z . В случае точения линии уровня обработанной поверхности будут представлять собой окружности. Для получения поверхностей с линиями уровня более сложной формы может быть использован быстрый сервопривод инструмента (*fast tool servo*). Такой привод имеет широкий частотный диапазон и позволяет производить быстрое изменение относительного положения инструмента и заготовки в пределах одного оборота заготовки. Наибольшее распространение получили пьезоэлектрические и электромагнитные сервоприводы.

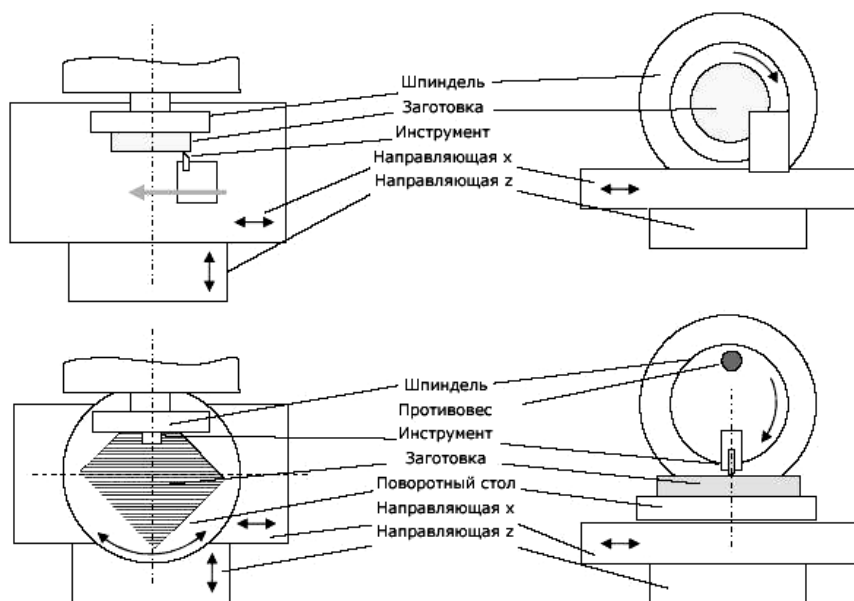


Рис. 4.16. Схемы процессов механической обработки офтальмологических изделий и матриц для их формования:
a – алмазным точением; *b* – точением летучим резцом

Разработана технология изготовления акриловых и силиконовых интраокулярных линз со сложным профилем поверхности путем

лазерного травления. Для травления используется дальнейшее ультрафиолетовое излучение. Трехмерная компьютерная модель поверхности линзы разбивается на двумерные слои, толщина которых выбирается с учетом глубины травления, получаемой для обрабатываемого материала при воздействии единичного лазерного импульса. Полученные в результате разбиения сечения используются для управления пикселями специального проекционного устройства, которое профилирует поток лазерного излучения в соответствии с формой этих сечений. Последовательное изменение профиля светового потока позволяет производить послойное травление трехмерной поверхности линзы.

Известна технология изготовления офтальмологических изделий (контактных и интраокулярных линз, роговичных колец (corneal onlays) и т. п.) с помощью стереолитографических машин. Стереолитография представляет собой процесс изготовления сложных изделий с трехмерными поверхностями путем послойной фотополимеризации. Форма слоев определяется формой поперечных сечений трехмерной компьютерной модели изделия параллельными плоскостями, расстояние между которыми соответствует толщине полимеризуемого слоя. Стереолитографическая машина состоит (рис. 4.17) из платформы, погруженной в сосуд со смесью жидкого мономера и фотоинициатора, ультрафиолетового гелий-кадмиевого или аргонового лазера и системы сканирования лазерного луча. Лазер сканирует первый слой в соответствии с формой сечения компьютерной модели, после чего платформа погружается на величину, равную толщине полимеризованного слоя, и сканируется следующий слой. Процесс продолжается до тех пор, пока не будут полимеризованы все слои изделия.

В случае применения специального проекционного устройства может производиться одновременная полимеризация слоя без сканирования лазерного луча.

Преимущество описанных технологий, основанных на лазерном травлении и фотополимеризации, состоит в возможности изготовления индивидуальных линз, форма поверхности которых проектируется с учетом особенностей рефракции глаза конкретного пациента. Применение литьевого формования для изготовления таких линз экономически невыгодно вследствие высокой стоимости матриц.

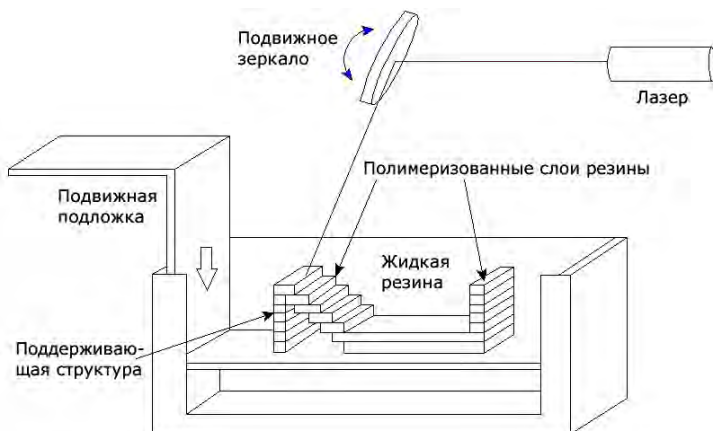


Рис. 4.17. Принципиальная схема стереолитографической машины

4.5.3. Основные этапы операции по замене хрусталика глаза

Сегодня операцию удаления катаракты (факоэмульсификацию) можно выполнять без госпитализации. До операции пациенту делают анестезию оперируемого глаза, затем хирург делает маленький разрез (3 мм), через который вводит в глаз инструмент, с помощью которого происходит разрушение естественного хрусталика за счет воздействия импульсной струей жидкости высокого давления (рис. 4.18).

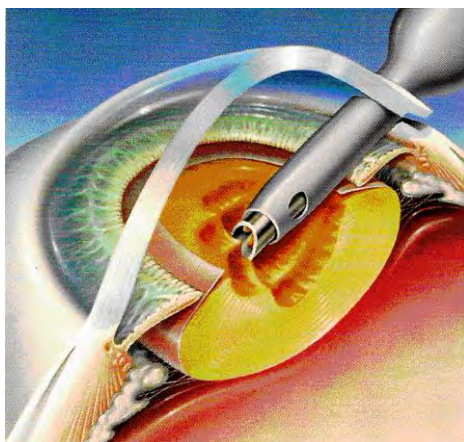


Рис. 4.18. Этап разрушения естественного хрусталика за счет воздействия импульсной струей жидкости высокого давления

После удаления катаракты в глаз через тот же разрез в свернутом виде вводится интраокулярная линза (рис. 4.19, *а*). Затем она соответствующим образом устанавливается на постоянное место (рис. 4.19, *б*). Вся операция длится 20–30 минут.

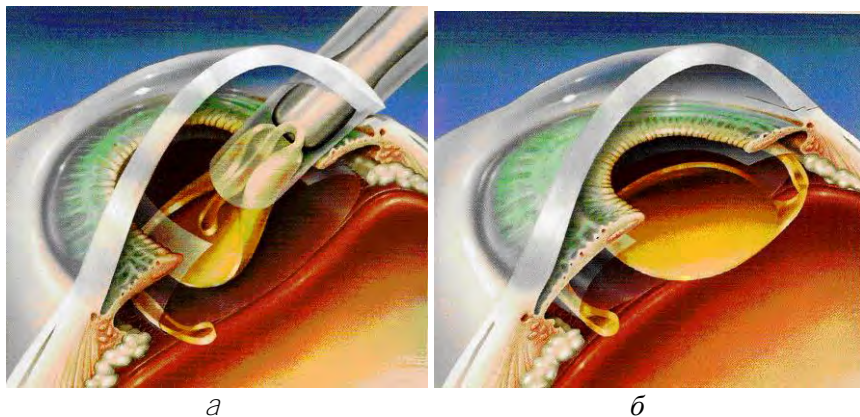


Рис. 4.19. Этапы установки интраокулярной линзы:
а – введение интраокулярной линзы в свернутом виде;
б – установка линзы на постоянное место

Одной из важных проблем, связанных с имплантацией интраокулярных линз, является выбор их оптической силы. Погрешности предоперативных измерений, вариация положения линзы внутри глаза и постоперативный астигматизм приводят к тому, что эметропия глаза достигается после операции только у 45 % пациентов. Остальные нуждаются в коррекции зрения с помощью очков и имеют постоперативную ошибку рефракции в пределах 2 дптр. С учетом этого факта становится необходимой разработка способов неинвазивной постоперативной коррекции оптической силы имплантированной линзы *in situ*. Один из таких способов заключается в следующем. В качестве материала линзы используется силиконовая матрица, в которую введены фотореактивный макромер, фотоинициатор и поглотители ультрафиолетового излучения, связанные с матрицей (рис. 4.20). Облучение такого материала ультрафиолетовым излучением с длиной волны 365 нм приводит к полимеризации макромеров в области экспозиции. В результате этого возникает

диффузия макромеров из неэкспонированных областей в экспонированную, стремящаяся уравнять концентрацию макромеров во всем объеме матрицы. В случае облучения центральной части линзы диффузия макромеров из неэкспонированной периферической части приводит к разбуханию центральной части, увеличивая ее оптическую силу, что может быть использовано для коррекции гиперметропии.



Рис. 4.20. Стадии неинвазивной постоперативной коррекции оптической силы имплантированной линзы *in situ*

После проведения коррекции оптической силы линза подвергается экспозиции во всем объеме, в результате чего происходит полная полимеризация макромеров. Это исключает возможность дальнейшего изменения оптической силы линзы. Для коррекции миопии может производиться экспозиция периферической части линзы.

ГЛАВА 5. ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕМЕНТОВ И СИСТЕМ ВОЛОКОННОЙ ОПТИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МЕДИЦИНСКИХ ЭНДОСКОПАХ

5.1. Основные сведения о медицинских эндоскопах с волоконной оптикой

Одним из важнейших методов диагностики и лечения различных заболеваний является эндоскопия. С помощью эндоскопической техники проводятся визуальный осмотр внутренних полостей организма человека, биопсия, хирургическое и терапевтическое воздействие на биологические ткани лазерным излучением, промывание полости и наполнение ее воздухом или жидкостью, введение лекарственных растворов, удаление новообразований и инородных тел и т. д. Кроме визуального наблюдения, может проводиться фото- и ТВ-документирование отдельных этапов эндоскопии.

В общем случае *эндоскопом* (от греч. *endon* – внутри и *skopeo* – смотрю, рассматриваю, наблюдаю) называется устройство, имеющее осветительную, наблюдательную системы и приспособления. Это устройство предназначено для введения во внутренние полости тела человека, машин и механизмов с целью осмотра и проведения различных манипуляций. Все эндоскопы делятся на два больших класса: технические и медицинские. *Медицинским эндоскопом* называется эндоскоп, вводимый во внутренние полости и органы человека через естественные каналы или хирургическим путем.

Первые сведения об удачных попытках осмотра отдельных полостей относятся к началу XIX в. В 1805 г. врач Филипп Боццини изобрел устройство, позволяющее осматривать полость мочевого пузыря. Суть изобретения заключалась в том, что в исследуемую полость вводилась смотровая металлическая трубка, в которую с помощью зеркала направлялся пучок света от керосиновой лампы. В 1853 г. французский хирург Дезорм демонстрировал первую модель эндоскопа. Он состоял из осветителя, зеркала-рефлектора и набора металлических трубок, предназначенных для осмотра пищевого тракта, мочевого пузыря, матки, прямой кишки.

Однако, предложенные в различное время эндоскопические конструкции имели общий недостаток: источник света располагался проксимально, а лучи направлялись через узкую длинную трубку,

что не позволяло вводить в просвет смотровой трубки какие-либо манипуляционные инструменты.

Революция в эндоскопии произошла в 60-е гг. XX в. в связи с появлением гибких приборов с волоконной оптикой. Первый волоконный эндоскоп был продемонстрирован в 1958 г., а в 1963 г. впервые был создан телевизионный эндоскоп.

Номенклатура эндоскопов с волоконной оптикой (фиброэндоскопов), представленных на мировом рынке, весьма обширна. Наибольшим разнообразием отличаются гибкие эндоскопы для исследования различных отделов пищеварительного тракта и дыхательных путей. Менее разнообразна номенклатура приборов для использования в оториноларингологии, урологии и гинекологии.

Несмотря на разнообразие гибких медицинских эндоскопов, большинство из них строится по типовой схеме, представленной на рис. 5.1, с разделением оптического канала передачи изображения на компоненты 4, 5, 6 и осветительного канала на компоненты 2, 3.

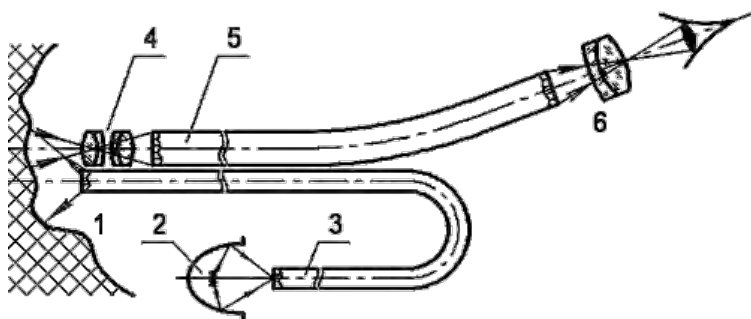


Рис. 5.1. Типовая схема гибкого медицинского эндоскопа:

- 1 – исследуемый объект; 2 – источник света; 3 – волоконный осветительный световод; 4 – объектив эндоскопа; 5 – гибкий волоконный световод для передачи изображения; 6 – окуляр

Исследуемый объект 1 освещается источником света 2 при помощи гибкого осветительного световода 3. Объектив 4 эндоскопа строит изображение исследуемого объекта на входном торце волоконного жгута 5 с регулярной укладкой волокон, который переносит изображение на выходной торец. Изображение рассматривается при помощи окуляра 6.

В общем виде гибкий эндоскоп (рис. 5.2) представляет собой гибкую протяженную трубку I, соединенную с корпусом II, который служит рукояткой для удержания прибора при эксплуатации; на корпусе установлен окуляр III. Гибкий кабель IV через разъем V соединяет эндоскоп с внешним источником света, воздуха и воды.

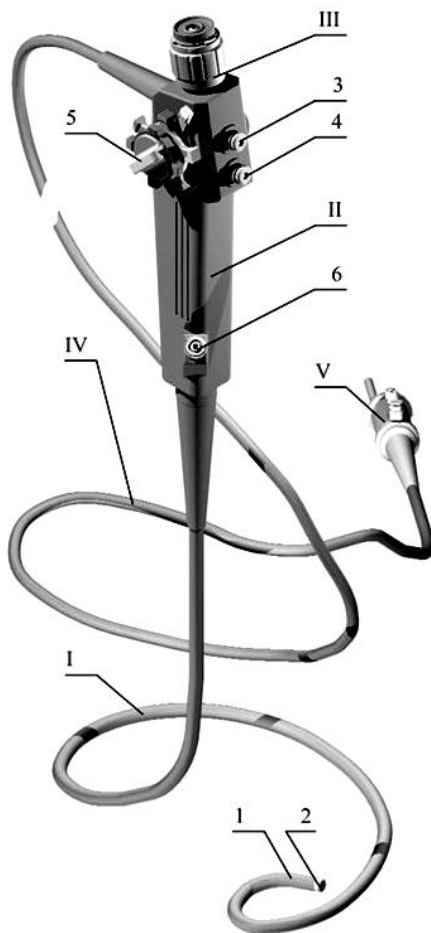


Рис. 5.2. Общий вид гибкого медицинского эндоскопа с волоконной оптикой:
 I – гибкая рабочая часть; II – корпус; III – окуляр; IV – соединительный кабель;
 V – разъем осветителя; 1 – управляемый дистальный конец; 2 – головка; 3 – кнопка
 подачи воды и воздуха; 4 – кнопка управления аспирацией; 5 – ручки управления
 дистальной частью; 6 – вход инструментального канала

Дистальный конец 7 рабочей части I при помощи ручек управления 5 может принудительно изгибаться под разными углами в одной или двух плоскостях, благодаря чему осуществляются введение прибора и последовательный осмотр участков исследуемой полости.

Внутри гибкой рабочей части расположены основные функциональные системы прибора: каналы передачи изображения и света, воздуха и воды, канал 6 для проведения гибких инструментов, который используется также для аспирации содержимого полости при исследовании. Каналы имеют выход через головку 2 дистальной управляемой части I.

В корпусе II монтируются механические системы управления изгибом дистальной части, подачей воздуха, воды и аспирацией.

Рабочая часть снаружи покрыта эластичными оболочками, обеспечивающими нетравматичное проведение прибора по анатомическому каналу и защищающими от попадания влаги во внутренние коммуникации эндоскопа.

Основой гибкого эндоскопа является оптическая система передачи изображения, состоящая из установленного в головке 2 объектива и гибкого жгута из регулярно уложенных стеклянных нитей, проложенного внутри гибкой части I, а также окуляра III, с помощью которого рассматривается получаемое после оптического жгута изображение с некоторым увеличением.

Необходимый для осмотра внутренней полости уровень освещения обеспечивается передачей света через гибкий стекловолоконный световод, проложенный внутри гибкой части эндоскопа и переходящий в кабель IV, последний с помощью стандартного разъема V присоединяется к внешнему источнику света. Через кабель от источника также подаются необходимые для проведения исследования воздух и вода, переключение которых производится с помощью установленной на корпусе кнопки 3; аналогичная кнопка 4 служит для управления аспирацией содержимого полости.

5.2. Распространение света в оптических волокнах и волоконно-оптических пучках

Распространение света в оптических волокнах основано на явлении полного внутреннего отражения, которое состоит в том, что луч, распространяющийся в среде и падающий на границу ее раздела с

оптически менее плотной средой, частично проходит в эту среду (испытывает преломление) лишь при углах падения меньших критического, называемого углом полного внутреннего отражения. Для углов падения больших критического преломление не наблюдается, а происходит внутреннее отражение луча. В случае оптического волокна луч испытывает многократное внутреннее отражение на границе раздела сердцевины волокна с показателем преломления n_c и его оболочки, имеющей меньший показатель преломления $n_o < n_c$, и благодаря этому не выходит за пределы сердцевины (рис. 5.3). Критический угол падения ε_c , соответствующий полному внутреннему отражению, будет в рассматриваемом случае определяться выражением $\varepsilon_c = \arcsin(n_o/n_c)$.

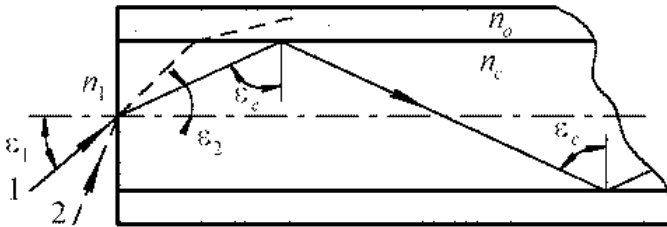


Рис. 5.3. Прохождение луча вдоль прозрачного цилиндра с плоским торцом

Для того, чтобы найти критический угол падения ε_1 лучей на входной торец волокна, при превышении которого (луч 2) свет перестанет испытывать полное внутреннее отражение в сердцевине и будет выходить за ее пределы (апертурный угол), воспользуемся тем, что $\varepsilon_c = \pi/2 - \varepsilon_2$ или $\cos \varepsilon_c = \sin \varepsilon_2$. Если считать, что волокно находится в воздухе ($n_1 = 1$), то по закону преломления $\sin \varepsilon_2 = n_1 \sin \varepsilon_1 / n_c = \sin \varepsilon_1 / n_c$. Так как $\varepsilon_c = \arcsin(n_o/n_c)$, то $\cos \varepsilon_c = \sqrt{1 - \sin^2 \varepsilon_c} = \sqrt{n_c^2 - n_o^2} / n_c$. Приравняв выражения для $\cos \varepsilon_c$ и $\sin \varepsilon_2$, получим формулу для апертурного угла:

$$\varepsilon_1 = \arcsin \sqrt{n_c^2 - n_o^2}.$$

Совокупность волокон образует волоконно-оптические пучки или жгуты, которые могут иметь регулярную (когерентную) и нерегу-

лярную укладку. Пучки с регулярной укладкой используются для передачи изображения, а с нерегулярной – для освещения. Важной характеристикой пучков с регулярной укладкой является их разрешающая способность, которая зависит от диаметра волокон и способа их укладки. Возможны квадратная и гексагональная укладки волокон (рис. 5.4).

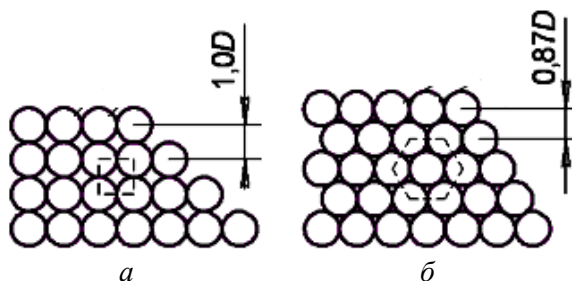


Рис. 5.4. Элементарные периоды для трех топологий укладки волокон в пучке:
а – квадратная; б – гексагональная горизонтальная

Гексагональная укладка является более плотной и поэтому обеспечивает более высокую разрешающую способность. Так как единичное волокно дает на своем выходе равномерное распределение интенсивности света независимо от характера распределения интенсивности на входе, то волоконно-оптический пучок производит дискретизацию изображения с периодом дискретизации, равным шагу Ш укладки волокон. Если рассматривать через волоконно-оптический пучок тестовое изображение, состоящее из параллельных линий, то максимальное количество линий на единицу длины (пространственная частота) ν_{\max} , при котором линии на выходе пучка будут различимы, будет представлять собой разрешающую способность пучка, выраженную в линиях на единицу длины. Это количество может быть определено по теореме Котельникова о дискретизации и должно быть в два раза меньше частоты дискретизации, которая, в свою очередь, является величиной обратной к периоду дискретизации:

$$\nu_{\max} = 1/2Ш .$$

Для квадратной решетки $\text{Ш} = D$, где D – диаметр волокна, а для гексагональной $\text{Ш} = 0,87D$, поэтому разрешающая способность пучка с гексагональной укладкой в 1,15 раз больше разрешающей способности пучка с квадратной укладкой.

5.3. Основные элементы эндоскопов с волоконной оптикой. Волоконно-оптические жгуты

Волоконно-оптические жгуты, наиболее часто используемые в приборостроении, имеют диаметры от 0,5 до 400 мм и длину от 0,5 до 4000 м и более.

В зависимости от способа изготовления жгуты с регулярной укладкой могут иметь площадь дефектов от 0,001 до 1 %. Эти жгуты допускают многократный изгиб с радиусом, равным 5–8 диаметрам жгута. Общее число жил в жгуте составляет 14 000–25 000.

Обычно осветительный жгут, применяемый в эндоскопах, раздваивается на два жгута, дистальные концы которых располагаются симметрично относительно жгута, передающего изображение (рис. 5.5, *а*). Однако миниатюризация эндоскопов, используемых, например, в офтальмологии, вызвала разработку системы «осветительный жгут – разрешающий жгут» в виде коаксиальных кольца и цилиндра (рис. 5.5, *б*).

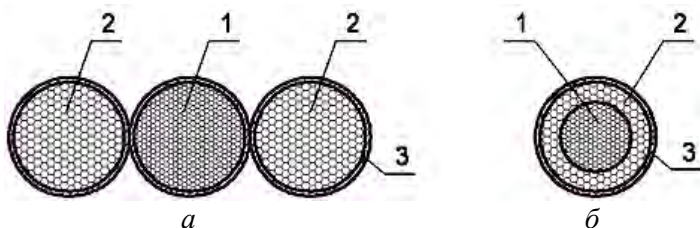


Рис. 5.5. Расположение осветительного и передающего изображение жгутов в эндоскопах:

а – традиционное; *б* – коаксиальное; 1 – жгут, передающий изображение; 2 – осветительный жгут; 3 – металлические втулки

Диаметр разрешающего жгута с регулярной укладкой волокон может достигать 0,3–0,5 мм, а длина жесткой спеченной части (как кольца, так и цилиндра) – от нескольких миллиметров до десятков сантиметров.

Осветительный жгут, применяемый в жестких эндоскопах, обычно имеет разъем у эндоскопа. В гибких эндоскопах и, особенно, в фото-, кино- и телеэндоскопах осветительный жгут представляет неразрывное целое с эндоскопом и не имеет разъемов. Обычно длина жгута от осветительного блока до эндоскопа лежит в пределах от 1,4 до 1,8 м, а общая длина жгута больше на длину самого эндоскопа.

Над производством осветительных жгутов работает более 40 фирм, выпускающих почти 2000 различных типов жгутов, отличающихся длиной, сечением, оболочкой и наконечниками. Выпускаются жгуты и с разветвлением на входе, подключаемые к двум конденсорам с целью максимального использования светового потока от источника излучения.

Осветительные жгуты имеют круглую или прямоугольную форму сечения входного торца, что дает возможность обеспечить соответствие сечения жгута форме тела накала источника света. На промежуточных разъемах торцы жгутов круглые, что упрощает конструкцию разъема, исключая закручивание жгута. Либо выходной торец жгута размещается сбоку объектива, а ось выхода жгута направлена на центр рассматриваемого объекта, либо выходной конец объектива делится на две части (см. рис. 5.5, *а*), либо волокна жгута располагаются кольцом вокруг объектива (см. рис. 5.5, *б*). Первый способ освещения обеспечивает лучшее наблюдение рельефа, так как создает тени и блики от неровностей поверхностей, последний же создает равномерное освещение, но изображение менее рельефно.

Защитные оболочки жгутов предназначены для предохранения волокон от разрушения при перегибах, закручивании, сплющивании, от разрыва и проникновения влаги. Кроме того, оболочка должна обладать высокой гибкостью, быть достаточно легкой, чтобы жгут не оттягивал руку врача, удерживающего эндоскоп. Существует множество конструкций оболочек, например, металлические спирали (плоские и фасонные), для предотвращения закручивания одетые в металлическую сетку, а для герметичности – в наружную резиновую или латексную оболочку и др.

Наконечники служат для соединения жгута с осветительным блоком и со световодом эндоскопа. Известно более 80 типов наконечников жгутов и почти столько же типов гнезд к ним. Разнообразие типов наконечников пока не обеспечивает взаимозаменяемость жгу-

тов, выпускаемых различными фирмами. Наконечники обеспечивают прочность соединения, точность совпадения торцов жгута с изображением тела накала источника света и с торцом световода эндоскопа. Через наконечник жгут своими концами соединен с гибкой оболочкой. Для предотвращения облома волокон в месте перехода жесткого наконечника к гибкой части применяются смягчители (обычно резиновые или пластмассовые трубки, охватывающие оболочку и утончающиеся с удалением от наконечника).

5.4. Изготовление волоконно-оптических жгутов

5.4.1. *Материал для изготовления световодов*

Световоды изготавливают из оптического стекла и полимерных материалов. Наибольшее распространение получили световоды из оптического стекла, так как они имеют высокую оптическую однородность и механическую прочность.

Процесс изготовления световодов связан с одновременным формированием жилы и оболочки из разогретой до пластического состояния стекломассы. Поэтому стекло, используемое для жилы, и стекло для оболочки должны быть химически и технологически совместимы.

Химически совместимыми считаются стекла, у которых на поверхности спекания при температуре выработки не образуются кристаллы, не нарушается поверхность раздела при появлении пузырьков и диффузии ионов. Отмеченные дефекты приводят к резкому увеличению рассеяния света и уменьшению отражательной способности на границе жила–оболочка.

Технологически совместимыми являются стекла, имеющие в диапазоне температур от 20 °С до температуры спекания близкие значения температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), а также одинаковые вязкости при температуре выработки. Увеличение разности ТКЛР у пары стекол жила–оболочка выше $(2-3) \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ приводит к появлению в пограничном слое натяжений, трещин и отслоений, в процессе как изготовления, так и эксплуатации световодов.

Технологический процесс варки стекол для световодов волоконной оптики принципиально не отличается от процессов варки бесцветных оптических стекол. Его особенностью является применение для составления шихты особо чистых материалов и создание

условий, не допускающих попадание в стекло загрязнений из окружающей среды и аппаратуры варочных устройств.

В качестве материала жилы для волоконных элементов, работающих в инфракрасной области спектра, используют бескислородные стекла.

Световоды без оболочки хорошо вытягиваются из кварца. Они имеют высокую однородность и прозрачность в видимой и ультрафиолетовой частях спектра, высокую механическую прочность. Однако применение кварца для световодов с оболочкой связано с определенными технологическими трудностями, что объясняется высокой температурой размягчения кварца, его химической активностью при температурах плавления и технологической несовместимостью с большинством пригодных для оболочек материалов, имеющих низкий показатель преломления.

Для изготовления оптического волокна применяют также высокопрозрачные полимерные материалы: сополимеры метилметакрилата и метилакрилата. Полимерные волокна термостойки до 80 °С, гибки, допускают без разрушения многократный изгиб. В отличие от большинства стекол, используемых для изготовления оптического волокна, полимеры радиационно-стойки при воздействии γ -излучения до 104 Р и не уменьшают светопропускание вследствие появления окраски после облучения.

5.4.2. Способы изготовления одножильных световодов

Одножильные жесткие и гибкие стеклянные световоды с оболочкой изготавливают вытягиванием из расплава пары стекол или вытягиванием из размягченного конца комплекта, состоящего из трубки-оболочки и штобика-жилы.

Вытягивание из расплава пары стекол (рис. 5.6) осуществляется из платинового тигля, помещенного в камерную печь δ с силитовыми нагревателями ϑ .

Тигель имеет цилиндрическую часть ζ , окруженную кольцевым пространством η , которое разделено радиально направленными перегородками на секцию для стекол жилы, которая соединена с цилиндрической частью тигля протокой.

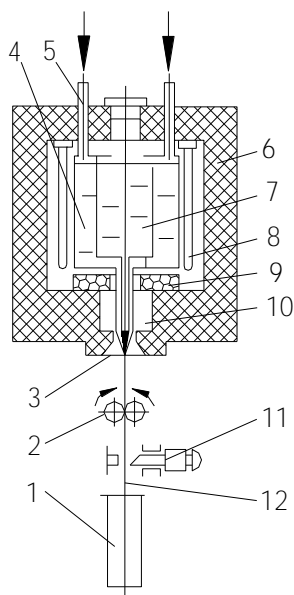


Рис. 5.6. Схема установки для вытягивания жестких световодов

Каждая секция делится на камеры перегородками, образующими систему сообщающихся сосудов. Расплавленное стекло перетекает тонким слоем через лабиринт перегородок, что обеспечивает хорошее освещение стекла. Дно тигля подогревается нагревателем 9. В дне имеются коаксиально расположенные патрубки, соединенные с выпускными камерами секций. Сечение этих патрубков может быть круглым, квадратным, шестигранным. После включения нагревателя 10 стекло вытекает из патрубков, образуя «луковицу» 3. Из нее с помощью вращающихся роликов 2 непрерывно вытягивают световод 12 заданного диаметра. Заготовки длиной 1,0–1,2 м отрезаются устройством 11 и падают в бункер-накопитель 1. По мере выработки стекломассы по команде уровнемера через загрузочные отверстия 5 в тигель добавляют новые порции стекла в виде кубиков с размером сторон ~15 мм. Диаметр световодов регулируется скоростью вытягивания и изменением температуры в зоне выработки.

На рис. 5.7 представлена схема установки для вытягивания световодов из комплекта штабик-трубка.

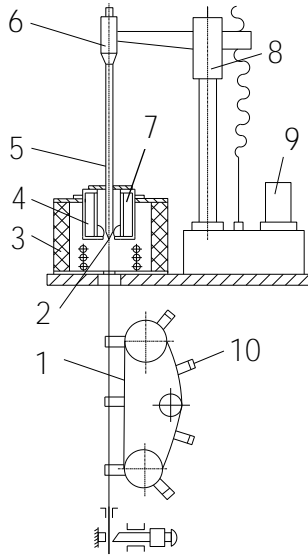


Рис. 5.7. Схема установки для вытягивания световодов из комплекта штабик-трубка

Комплект 5 закрепляется в цанге 6 подвижной каретки 8 механизма подачи 9 и вводится в печь 3 через сменную фильеру 4. Размягченный конец комплекта 2, постоянно находящийся в зоне нагрева, спекается и вытягивается в световод с помощью устройства 1. Оно представляет собой непрерывную цепь с закрепленными на ней подвижными захватами 10. Фильера закреплена в стакане 7.

Скорость подачи комплекта v_k и скорость вытягивания световода v_c связаны соотношением

$$v_k / v_c = d_{ш}^2 / d_c^2, \quad (5.1)$$

где $d_{ш}$ и d_c – соответственно диаметры штабика и световода.

Выработка волокна диаметром 10–50 мкм из расплава выполняется на установке, схема которой представлена на рис. 5.8.

Стекло́нная нить 2 вытягивается из тигля 3, перебрасывается через отклоняющий ролик 1 и с помощью раскладчика 7 послойно с шагом t наматывается на вращающуюся бобину 8 намоточного станка 9.

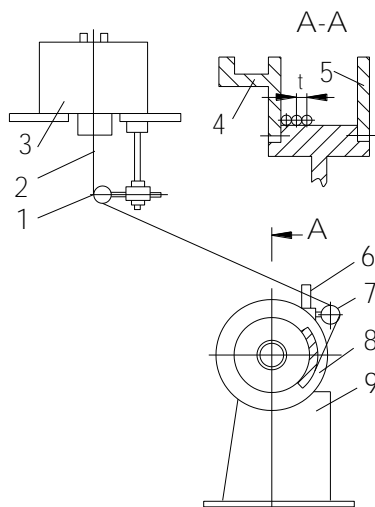


Рис. 5.8. Схема установки для выработки гибкого волокна

При пуске намоточного станка или обрыве нить закрепляется в боковую канавку 4 бобины. После того, как процесс вытягивания стабилизируется и обеспечивается необходимый диаметр волокна, последнее вручную переводится в ролик раскладчика 7 для намотки на бобину. Перемещение раскладчика происходит от вращающегося копира 6. Процесс намотки считается законченным, когда волокно послойно заполнит полость между щечками 5, после чего бобину снимают с намоточного станка.

Для получения однородного оптического волокна необходимо управлять двумя основными параметрами: скоростью намотки световода и скоростью подачи заготовки. Если рассмотреть достаточно длинный период времени протягивания волокна, то при усреднении по времени протягивания материал не будет накапливаться в области «луковицы» в горячей зоне печи. Математически это выражается тем, что усредненные за время протягивания произведение квадрата радиуса на скорость протягивания для заготовки и волокна должны быть равны. Однако, для коротких по времени интервалов приведенное соотношение не будет выполняться в силу того, что наложение «луковицы» флуктуирует (колеблется) по вертикали относительно источника нагрева. Это неизбежно приводит к колебаниям диаметра волокна, что особенно проявляется в самом начале подачи заготовки.

Луковица сохраняется в результате баланса натяжения, создаваемого вытяжным устройством, поверхностного натяжения стекла (для различных марок стекол с различными добавками коэффициент поверхностного натяжения различен), веса и степени вязкости стекла. При этом на условия поддержания этого баланса существенное влияние оказывает постоянство распределения температуры в зоне нагрева «луковицы».

В идеале зона нагревания должна быть минимальна по размерам и хорошо контролируема. Наилучшим образом этим требованиям удовлетворяет способ лазерного плавления, схема которого представлена на рис. 5.9.

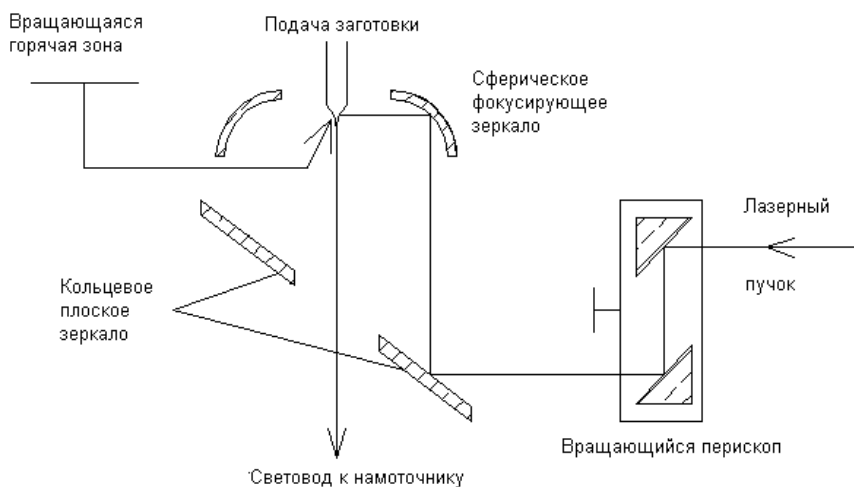


Рис. 5.9. Схема, поясняющая способ зонного лазерного плавления стеклянной заготовки при вытягивании волокна

Лазерный луч падает на вращающийся зеркальный перископ таким образом, что выходящий луч сканирует по образующей цилиндра диаметром несколько сантиметров, попадает на наклонное зеркало с отверстием в центре, через которое пропускается световодное волокно. Затем сканирующий пучок с помощью вогнутого зеркала сводится во вращающееся фокальное пятно в фиксированной точке у конца заготовки, где образуется «луковица». При условии, что заготовка точно отцентрирована относительно фокальной точки

оптической системы, «луковица» однородно нагревается со всех сторон и существенно уменьшается, благодаря тому, что сфокусированный пучок очень узок. При этом мощностью лазерного луча можно достаточно легко управлять. Подобная вытяжная установка позволяет справиться с переходными флуктуациями диаметра волоконного световода, возникающими из-за механического дрейфа положения луковицы, характерными для вытяжных установок с протяженной горячей зоной.

Формование полимерного волокна осуществляется методом экструзии. На рис. 5.10 показана схема применяемой экструзионной головки.

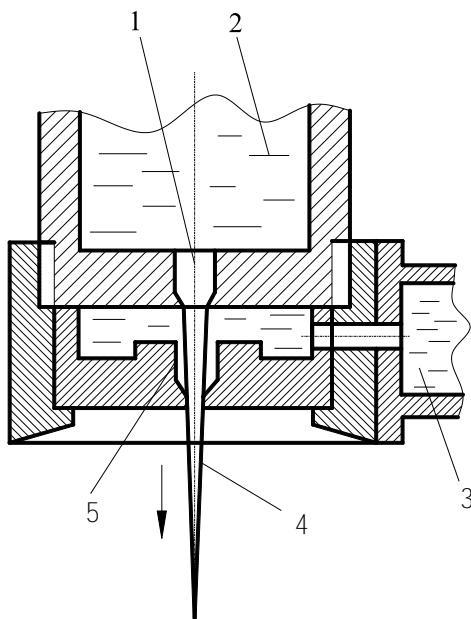


Рис. 5.10. Схема экструзионной головки для формирования полимерного волокна

Полимер из расплава 2 через центральную фильеру 1 выдавливается под давлением в виде нити 4, которая обволакивается материалом оболочки 3, поступающим через кольцевую фильеру 5. Полученное волокно наматывается на бобину намоточного станка.

Многожильные световоды, которые обеспечивают высокую разрешающую способность, изготавливают перетяжкой пакета одножильных световодов в один многожильный при температуре пластической деформации стекла. Для этого одножильные световоды длиной 1200 мм, проконтролированные по геометрическим размерам и тщательно очищенные от загрязнений и жировых пятен укладывают на приспособлении в пакет, по форме сечения, соответствующей будущему световоду (круглому, квадратному, шестигранному) с размером стороны пакета 50–75 мм.

Затем пакет, скрепленный обжимками, переносится на установку для перетяжки, которая по конструкции аналогична установке для вытяжки жестких световодов (рис. 5.6). Один конец пакета закрепляется в цанге каретки механизма подачи, другой через направляющую втулку, которая по форме и размерам соответствует сечению пакета, вводится в зону разогрева печи. После оплавления нижнего конца осуществляют перетяжку пакета на световоды диаметром 0,8–2 мм или волокно диаметром 50–70 мкм.

5.4.3. Изготовление гибких волоконных жгутов

В зависимости от назначения гибкие жгуты разделяются на осветительные из нерегулярно уложенных волокон и для передачи изображения из регулярно уложенных волокон. Жгуты выпускают в различных вариантах исполнения в зависимости от формы торца, вида оболочки и наконечников.

На рис. 5.11 представлены основные элементы гибкого волоконного жгута 4 с круглыми торцами 1 диаметром d , заделанного в поливинилхлоридную оболочку 3 с фасонными наконечниками 2 на концах.

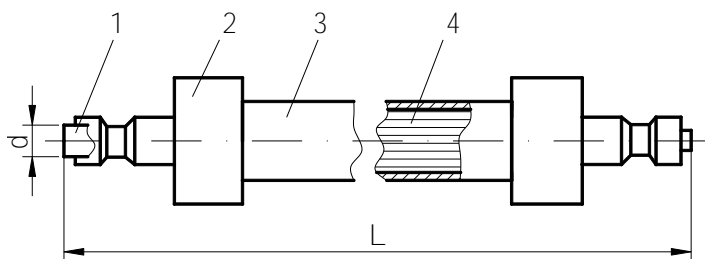


Рис. 5.11. Основные элементы гибкого волоконного жгута

Стандартные жгуты выпускают длиной L до 1500 мм и с наибольшим диаметром d или стороной прямоугольника до 15 мм.

Гибкие жгуты для передачи света и изображения с невысокой разрешающей способностью $10\text{--}15\text{ мм}^{-1}$ изготавливают в такой последовательности.

Намотанное на бобину волокно через пазы на цилиндрической поверхности корпуса бобины скрепляется струбцинами и разрезается на жгуты. Наибольшая длина жгута равна длине образующей бобины, а сечение имеет квадратную форму с размерами не более 100×100 мм. Полученный жгут находится в скрученном состоянии, поэтому его необходимо выпрямить. Для этого жгут нагревают до температуры, при которой короткие волокна, лежащие ближе к центру бобины, вытянутся под действием собственного веса или небольших добавочных грузов.

После этого осуществляют виброукладку с целью удаления полуманнанных волокон и получения идентичности расположения волокон на торцах. Для этого распрямленный жгут одним концом закрепляют в обжимку 3 установки для виброукладки гибкого жгута (рис. 5.12).

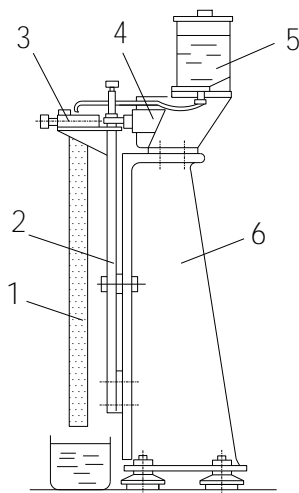


Рис. 5.12. Схема установки для виброукладки гибкого жгута

В процессе виброукладки жгут 1, подвешенный в вертикальном положении подвергают воздействию вибраций, создаваемых систе-

мой, состоящей из электромагнитного вибратора 4 и резонансной балки 2, закрепленных на основании 6. Одновременно на верхний конец жгута из бачка 5 подается дистиллированная подмыленная вода. С незафиксированного конца жгута выпадают поломанные в процессе намотки волокна. В конце виброукладки жгут промывается чистой дистиллированной водой и просушивается. После сушки торцы жгута закрепляют клеящим составом, обычно композицией на основе эпоксидной смолы и выдерживают в вакууме при нормальной температуре до отвердевания. Затем торцы шлифуют и полируют. Проклеенные квадратные жгуты с отполированными торцами контролируют и после разметки разделяют на заготовки меньшего сечения путем раскалывания ножом по торцам. На окончательно подогнанные по размерам сечения волоконные жгуты надевают оболочки и приклеивают наконечники. Торцы собранных жгутов, выступающие из наконечников на 0,5–1,5 мм, шлифуют и полируют с применением абразивной и полирующей суспензии.

Жгуты с высокой разрешающей способностью (более 30 мм¹) изготавливают из многожильного волокна обычно с гексагональной формой сечения. Волокна после вытяжки в холодном состоянии перематывают в один слой на цилиндрический барабан с плотной упаковкой. Получившуюся кольцевую полосу приклеивают и снимают с барабана. Полосы набирают в пакет и спекают под давлением в форме. Далее технологический процесс аналогичен описанному для жгутов с малой разрешающей способностью.

5.5. Механические системы управления эндоскопом

Для расширения функциональных возможностей эндоскопа и улучшения его оптико-механических характеристик в нем используются различные механизмы управления, основными из которых являются (рис. 5.13):

- механизм ориентации, позволяющий управлять направлением наблюдения за счет изгиба дистального конца эндоскопа при помощи рукояток управления. В зависимости от модели эндоскопа, обзор может осуществляться в одной плоскости (вверх – вниз) или в двух плоскостях (вверх – вниз, вправо – влево);

- окуляр эндоскопа, имеющий механизм диоптрийной регулировки;

– механизм юстировки входного торца осветительного жгута эндоскопа относительно оси оптической системы осветителя, предназначенный для обеспечения максимальной освещенности исследуемого объекта.



Рис. 5.13. Оптико-механическая схема эндоскопа

5.5.1. Конструкции гибкой части эндоскопа

Для обеспечения возможности изменить направление наблюдения в процессе исследования гибкие эндоскопы имеют управляемый дистальный конец, который может изгибаться от своего первоначального положения под некоторым углом (рис. 5.14). В некоторых моделях угол изгиба может превышать 200° .

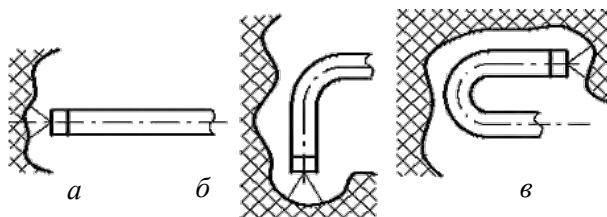


Рис. 5.14. Положение дистального конца эндоскопа в процессе исследований:
a – исходное положение дистального конца эндоскопа; *б* – дистальный конец эндоскопа изогнут вниз на 90° ; *в* – дистальный конец эндоскопа изогнут вверх на 180°

Необходимо обеспечить плавную и легкую управляемость дистального конца эндоскопа (рис. 5.15).

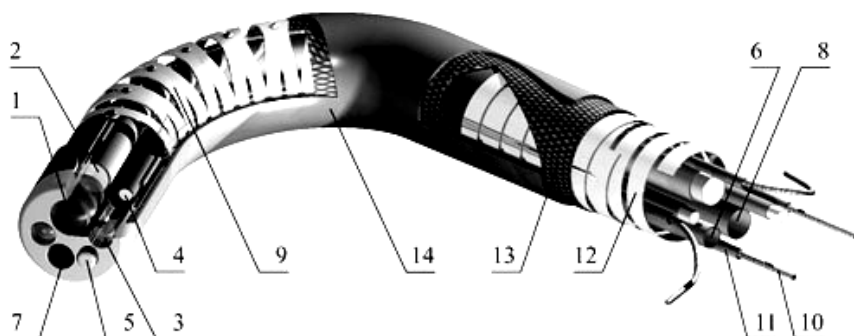


Рис. 5.15. Дистальный конец гибкого эндоскопа

В нем объединяются: объектив *1*, регулярный жгут *2* для передачи изображения, линза осветительного канала *3*, осветительный жгут *4*, полимерная трубка *6* для подачи жидкости при очистке защитного стекла объектива эндоскопа через форсунку *5* или воздуха для раздувания исследуемой внутренней полости с целью расправления складок стенок полости, гибкие сочленения *9*, тонкие металлические тросы управления *10*, выполняющие роль тяг при изгибе дистального конца, помещенные в гибкие металлические оболочки *11* – боудены (спиральные пружины из проволоки, навитые вплотную). В операционных эндоскопах предусмотрен канал *7* для введения хирургического инструмента по полимерной трубке *8*. Дистальный управляемый конец эндоскопа крепится к тубусу.

Тубусы современных гибких медицинских эндоскопов представляют собой многослойную конструкцию, состоящую из одной (рис. 5.16) или нескольких (до трех) спиральных ленточных пружин *1*, поверх которых надета металлическая плетенка *2*, соединенная с наружной пластмассовой оболочкой *3*. Такая конструкция позволяет получить тубусы высокой степени прочности на поперечное сжатие и смятие при необходимой жесткости на изгиб и кручение.

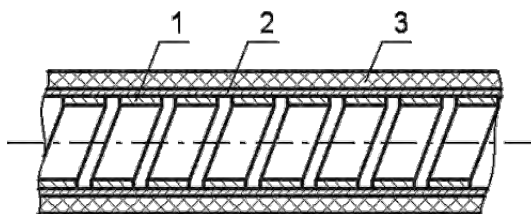


Рис. 5.16. Продольный разрез наружной оболочки (тубуса) гибкого медицинского эндоскопа:
 1 – спиральная ленточная пружина; 2 – металлическая плетенка;
 3 – пластмассовая оболочка

При эндоскопии различных органов человека большое значение имеют оптимальные жесткостные характеристики тубусов гибких эндоскопов, т. к. от них в определенной степени зависит возможность проведения эндоскопического исследования. Малая жесткость на изгиб может не позволить ввести эндоскоп в физиологический канал или затруднит проведение исследований в связи с плохой управляемостью. Изображение объекта, наблюдаемого через гибкий эндоскоп, не должно быть повернуто относительно объекта более чем на $\pm 15^\circ$, что обеспечивается требуемой жесткостью на кручение.

Тубусы медицинских эндоскопов имеют два типа конструкции: с пластмассовой оболочкой, насаженной на металлическую плетенку, в свою очередь, надетую на одинарную (тип I) либо двухслойную или трехслойную спиральную металлическую оболочку (тип II).

Тубусы с одинарной спиральной оболочкой широко распространены в гибких эндоскопах для исследования верхних отделов пищеварительного тракта человека. Для исследования нижних отделов пищеварительного тракта применяются в основном тубусы с трехслойной спиральной оболочкой, что обусловлено повышенными требованиями по жесткости тубуса колоноскопов на кручение. Эти повышенные требования обеспечиваются с помощью тройной спиральной оболочки, составленной из спиралей с разным направлением навивки. В настоящее время существует множество вариантов гибких сочленений управляемой части эндоскопа.

Первый способ: пластмассовая оболочка раздувается воздухом и надевается на металлическую плетенку, внутрь которой вставлена оболочка из спиральной пружины с натягом по диаметру.

Второй способ: пластмассовая оболочка наносится на металлическую плетенку методом экструзии. При этом материал оболочки проникает в промежутки между элементами металлической плетенки и тем самым обеспечивает их хорошее сцепление.

Третий способ: пластмассовая оболочка раздувается воздухом и надевается на металлическую плетенку со спиральной оболочкой с небольшим натягом, а затем внутрь оболочки, установленной вертикально, свободным истечением проливают растворитель в количестве, равном внутреннему объему тубуса. В процессе испарения растворителя происходят усадки набухшего полимера оболочки и снятие внутренних напряжений, возникающих в оболочке при ее экструзии. Это приводит к плотному облегаанию металлической плетенки и проникновению полимера в ячейки металлической плетенки.

5.5.2. Механизм управления гибкой частью эндоскопа

Для управления гибкой частью эндоскопа используются различные механизмы, наиболее распространенные из которых представлены на рис. 5.17.

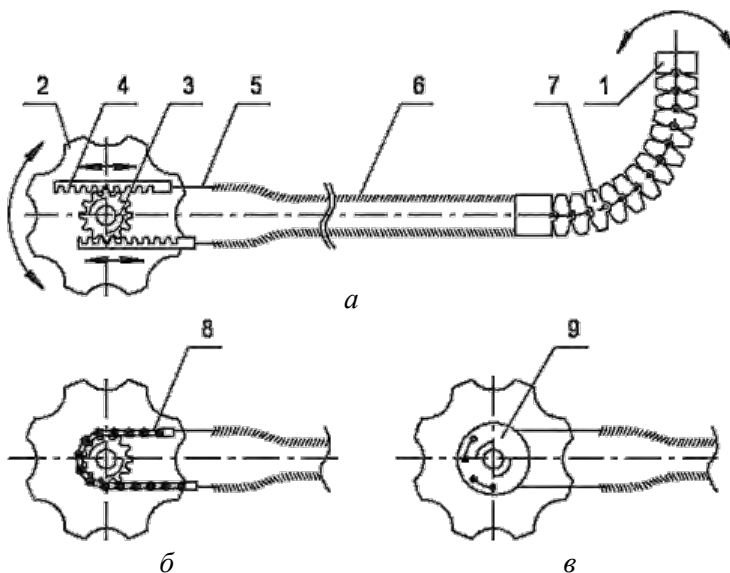


Рис. 5.17. Схема управления дистальным концом эндоскопа: а – с ременной передачей; б – с цепной передачей; в – со шкивом

Для отклонения дистального конца 1 в нужном направлении (рис. 5.17, а) вращательное движение рукоятки 2 с зубчатым колесом 3 преобразовывается в поступательное перемещение зубчатых реек 4, с которыми связаны гибкие тяги-тросы 5. Эти тяги проходят через гибкие оболочки 6, сочленение 7 и другим концом крепятся к объективной части. При вращении рукоятки 2 с зубчатым колесом 3 зубчатые рейки 4 перемещаются в противоположные стороны, натягивая одну и отпуская другую тягу 5. За счет разности усилий дистальный конец с гибким сочленением поворачивается в сторону с большим усилием тяги.

В ряде современных гибких эндоскопов вращательное движение зубчатого колеса преобразовывается в поступательное движение тяг-тросов при помощи цепной передачи 8 (рис. 5.17, б).

В эндоскопах с малогабаритными механизмами управления на одной оси с рукояткой (рис. 5.17, в) устанавливается шкив 9. Для задания пространственного положения гибкого сочленения одна группа тяг с помощью рукоятки наматывается на шкив, а другая сматывается со шкива. За счет изменения длины тяг гибкое сочленение изменяет свою траекторию независимо от длины гибкой части и кривизны ее изгиба.

При необходимости отклонения дистального конца не в одной, а в разных плоскостях требуется усложнение механизма управления, который содержит не одну рукоятку управления, а две сооснорасположенные. Каждая из рукояток управляет натяжением своей пары тросов, расположенных в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, тем самым обеспечивая отклонение дистального конца в различных направлениях.

ГЛАВА 6. ПОКРЫТИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

6.1. Типы покрытий и их свойства

На преломляющие и отражающие поверхности оптических деталей наносят покрытия – тонкие пленки различных веществ, в частности металлов, окислов металлов, диэлектриков, кремнийорганических соединений и др. Эти покрытия позволяют изменять оптические характеристики деталей, а также придавать им новые физические свойства. Покрытия могут быть одно-, двух-, трех- и многослойными, состоящими из чередующихся слоев пленок различных веществ.

В зависимости от назначения и физических свойств покрытия разделяются на следующие типы: просветляющие, отражающие, светоделительные, фильтрующие, поляризующие, токопроводящие и защитные.

Просветляющие покрытия применяются для уменьшения потерь света на отражение от поверхностей линз. Эффект просветления достигается созданием на преломляющей поверхности линзы прозрачной пленки с показателем преломления n более низким, чем показатель преломления материала подложки n_3 .

Физическая основа процесса просветления связана с интерференцией света. Свет, отраженный на границе воздух-пленка, интерферирует со светом, отраженным на границе стекло-пленка. При условии равенства амплитуд и сдвиге колебаний по фазе, равном $\lambda/2$, две отраженные волны могут подавить одна другую. Для выполнения этих условий коэффициент отражения от поверхности пленки $\rho_1 = [(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)]^2$ и коэффициент отражения от поверхности пленка-подложка $\rho_2 = [(n_3 - n_2)/(n_3 + n_2)]^2$ должны быть равны между собой:

$$[(n_2 - n_1)/(n_2 + n_1)]^2 = [(n_3 - n_2)/(n_3 + n_2)]^2.$$

Полагая $n_1 = 1$ (воздух), имеем $n_2 = \sqrt{n_3}$. Минимальная толщина пленки d определяется из условия, что оптическая разность хода лучей в пленке $\delta = \lambda/2$, отсюда геометрическая толщина просветляющей пленки $d = \lambda/4n_2$, а оптическая $n_2d = \lambda/4$.

Однослойное просветляющее покрытие теоретически позволяет уменьшить до нуля отражение света определенной длины волны λ от поверхности подложки. В качестве расчетной для видимой области спектра выбирают длину волны $\lambda = 540$ нм, расположенную в области максимальной чувствительности глаза человека – в зеленой части спектра.

При просветлении стекол с $n_3 = 1,51$ необходима пленка из вещества с $n_2 = \sqrt{1,23}$. Однако веществ, образующих прочные, стойкие в эксплуатации прозрачные пленки, с таким малым показателем преломления нет. Наиболее близкие показатели n имеют пленки фтористого магния MgF_2 ($n=1,38$) и криолита Na_3AlF_4 ($n=1,35$). Просветляющие покрытия из этих веществ снижают отражение на поверхности детали из стекла при однослойном просветлении до 1,33 и 0,75 % соответственно. У двухслойного просветляющего покрытия при оптической толщине слоев $\lambda/4$ интенсивность отражения света может быть равна нулю при условии $n_2/n_3 = \sqrt{n_4}$, где n_2 и n_3 – показатели преломления соответственно первого и второго слоев покрытия, а n_4 – показатель преломления материала подложки. Так коэффициент отражения для $\lambda = 540$ нм при двухслойном просветляющем покрытии, нанесенном на стеклянную подложку, не превышает 0,5 %.

Отражающие непрозрачные покрытия (зеркала) используют для изготовления оптических деталей, отражающих свет в видимой или в заданной части спектра излучения. Простейшими отражающими покрытиями, широко используемыми для изготовления призм, зеркал, отражателей осветительных устройств и т. п., являются металлические пленки серебра, алюминия, хрома.

Металлические отражающие покрытия, за исключением пленок хрома, механически не прочны, легко царапаются, неустойчивы к воздействию атмосферных условий при эксплуатации. Поэтому их необходимо защищать оксидными пленками или тонким слоем прозрачных лаков.

Прочные отражающие покрытия с коэффициентом отражения, близким к единице, получают нанесением на подложку многослойных пленочных покрытий из диэлектрических материалов. Детали с такими покрытиями получили название интерференционных зеркал.

Для их изготовления используют покрытия из нечетно чередующихся слоев диэлектриков с большими и малыми показателями преломления и оптической толщиной $0,5\lambda$, т. е. создают покрытия, имеющие антипросветляющие свойства.

В отличие от просветляющих покрытий наружный слой интерференционного покрытия должен иметь показатель преломления больший, чем показатель преломления подложки. С увеличением числа слоев коэффициент отражения увеличивается. Так, 15–17-слойные системы, представляющие собой чередующиеся слои пленок SiO_2 и TiO_2 или MgF_2 и ZnS имеют в широкой области спектра коэффициент отражения не менее 99 %. Используя системы пленок из различных диэлектрических материалов, можно изготовить интерференционные зеркала с избирательным отражением по спектру.

Прочные высокоотражающие покрытия с коэффициентом отражения 92–94 % получают нанесением на металлические пленки слоев тугоплавких веществ SiO_2 , TiO_2 или ZnO_2 . Такие покрытия называют металлодиэлектрическими, они имеют высокий коэффициент отражения в широкой полосе спектра с меньшим числом слоев пленки, чем у диэлектрических многослойных покрытий.

Светоделительные покрытия (полупрозрачные зеркала) делят световой поток на отраженный и проходящий. Они характеризуются отношением коэффициента отражения ρ_λ к коэффициенту пропускания τ_λ . Это отношение может быть получено в широком диапазоне путем нанесения на подложку металлических пленок разной толщины или пленок из диэлектриков.

Интерференционные фильтры выделяют из пучка ахроматического излучения участки спектра различной ширины. Наибольший интерес представляют фильтры, отсекающие инфракрасную или ультрафиолетовую часть спектра, а также узкополосные фильтры.

Фильтры – это многослойные системы, состоящие из 7–11 и более чередующихся слоев пленок. Их оптические свойства кроме спектральной характеристики определяются: длиной волны максимума пропускания λ_{\max} ; наибольшим значением коэффициента пропускания τ_{\max} ; шириной полосы пропускания $\delta\lambda_{0,5}$ для значения коэффициента пропускания, равного $0,5\tau_{\max}$; шириной полосы пропускания $\delta\lambda_{0,1}$ для значения коэффициента пропускания $0,1\tau_{\max}$.

Изготовление узкополосных фильтров – сложный технологический процесс, требующий применения особо чистых пленкообразующих материалов; высокого вакуума и прецизионного контроля толщины наносимых слоев пленок.

Поляризующие покрытия представляют собой многослойные покрытия из чередующихся слоев пленок с большим и малым показателем преломления, например $ZnS - Na_3AlF_6$, расположенные относительно направления светового потока под углом полной поляризации.

Поляризующие покрытия наносят на грань стеклянной призмы и заклеивают его с другой стороны призмой, идентичной первой. Доля поляризованного света в отраженном и проходящем пучках составляет до 99 %.

Токопроводящие прозрачные пленки используют как оптическое сопротивление для обогрева деталей или как проводник для удаления статических зарядов, образующихся при облучении детали потоком мощного электромагнитного излучения. Токопроводящие пленки применяют также как теплофильтры, пропускающие лучи в видимой части спектра (до 75 %) и отражающие инфракрасные лучи (до 80 %).

Получают токопроводящие покрытия нанесением на подложку тонких слоев окислов металлов: олова, кадмия, индия, тория и др. Эти окислы имеют высокую электрическую проводимость в тонких слоях (до 0,5 мкм), прозрачны. Вследствие высокого показателя преломления ($n = 2$) пленки коэффициент отражения от поверхности детали увеличивается до 12–15 %. После нанесения на деталь с токопроводящей пленкой просветляющих покрытий светопропускание повышается. Изменяя толщину токопроводящей пленки можно получить покрытие с различным электрическим сопротивлением.

Защитные прозрачные покрытия предохраняют полированные поверхности оптических деталей от разрушения и образования налетов в процессе эксплуатации. С этой целью на поверхность детали наносят прозрачную химически устойчивую пленку окислов кремния, тантала, фторорганического полимера Ф32Л и других веществ. Просветляющие покрытия, нанесенные на поверхность химически нестойких стекол, выполняют функцию защитного покрытия. Общее требование к защитным покрытиям – обеспечить химическую и механическую прочность стекла при неизменных оптических свойствах.

Для каждого вида покрытий в нормативно-технических документах приводятся характеристики термических свойств, механической прочности и влагоустойчивости. Эти характеристики учитывают при выборе покрытия и определения его функциональной пригодности к конкретным условиям эксплуатации оптической детали.

По механической прочности все покрытия разделены на пять групп:

0 – особо прочные, допускается протирка тканью с применением растворителей и без них в полевых условиях;

I – прочные, допускается чистка ватой или салфеткой с применением органических растворителей;

II – средней прочности, требуют осторожности при чистке ватой или салфеткой с применением органических растворителей;

III – непрочные, не допускающие механической чистки;

IV – механически и химически не прочные, требуют обязательной защиты после нанесения.

Количественно прочность на истирание характеризуется числом оборотов детали, при котором на пленке покрытия образуется сквозная царапина, наблюдаемая через лупу. Испытание на истирание производят на специальном приборе, который обеспечивает вращение детали с постоянной частотой 500 мин^{-1} под нагрузкой 2 Н с помощью резинового наконечника, обтянутого миткалевой тканью, смещенного относительно оси вращения детали на 5 мм. Покрытия, выдерживающие без повреждения не менее 3000 циклов, относятся к группе 0, не менее 2000 циклов – к группе I и не менее 1000 циклов – к группе II.

Термическая прочность определяется максимальной температурой, при которой пленка не теряет своих свойств, а также способностью выдерживать термоудар при перепаде температур от -60 до $+60$ °С.

Влагоустойчивость покрытий оценивается способностью пленки выдерживать без повреждений и изменения оптических свойств воздействие в течение 10 суток влажной атмосферы (95–98 % относительной влажности при температуре $+40 \pm 2$ °С), а также устойчивость к пятнаемости при попадании на поверхность капель пресной и морской воды.

6.2. Способы нанесения покрытий

Все способы нанесения покрытий подразделяются на химические и физические. К химическим относят осаждение вещества из раствора, электролиз, травление, осаждение вещества из паровой фазы. К физическим – термическое испарение вещества в вакууме, ионно-плазменное распыление веществ, катодное распыление.

6.2.1. Химические способы нанесения покрытий

Способ нанесения покрытий гидролизом спиртовых растворов применяется для получения просветляющих, светоделительных, фильтрующих и поляризующих покрытий оптических деталей. Основными пленкообразующими веществами являются растворы этиловых эфиров ортотитановой и ортокремниевой кислот, их смесей и раствор азотнокислого тория. Способ основан на быстрой омыляемости тонких слоев этиловых эфиров этих кислот под действием влажного воздуха комнатной температуры. Омыление – реакция спиртовой группы эфира с выделением воды. Получающийся при омылении этиловый спирт улетучивается, а двуокись кремния или титана осаждается на стекле прозрачной пленкой.

При этом способе необходимо поддерживать постоянную температуру 20–25 °С и влажность 50–60 % в производственном помещении. Более высокая температура и влажность приводят к интенсивному гидролизу и к получению неоднородной пленки. При меньшей влажности пленка сцепляется со стеклом из-за медленного протекания гидролиза.

Технологический процесс достаточно прост. В центр быстро-вращающейся детали пипеткой наносят дозированную порцию пленкообразующего раствора. Под действием центробежных сил раствор равномерно растекается по поверхности, образуя пленку. Ее толщина зависит от состава раствора, частоты вращения детали и последующей термообработки. Данный процесс в основном используют для получения одно- и двухслойных просветляющих покрытий, имеющих высокую механическую и химическую прочность (I-II группа).

Для осуществления процесса применяют одношпиндельные станки (рис. 6.1).

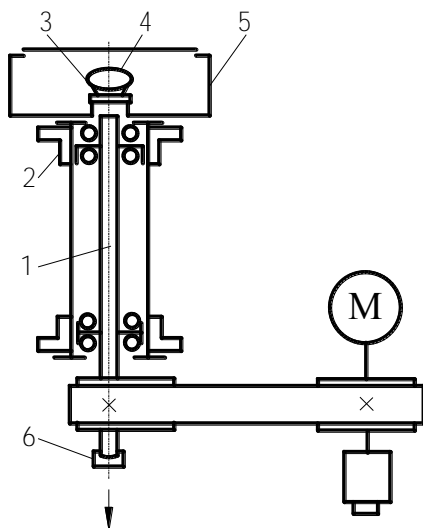


Рис. 6.1. Схема станка для химического просветления деталей

Станок имеет вертикально расположенный шпиндель 1 с бесступенчатым регулированием частоты вращения в пределах $6000\text{--}18000\text{ мин}^{-1}$ для линз диаметром до 30 мм и в пределах $1000\text{--}6000\text{ мин}^{-1}$ для линз диаметром 30–150 мм. Отклонение от заданной частоты вращения составляет $\pm 2\%$.

С целью уменьшения вибраций шпинделя станка электродвигатель М и шпиндель 1 смонтированы на резиновых втулках-амортизаторах 2. Шпиндель полый, на верхнем его конце устанавливается патрон 3 для закрепления детали 4, нижний конец имеет уплотнение 6 для соединения с вакуумной системой. Рабочая зона станка закрыта цилиндрическим кожухом 5. Для закрепления детали в процессе нанесения покрытий могут использоваться вакуумный и цанговый патроны, а также может применяться механическое крепление детали.

При двухслойном химическом просветлении на поверхность быстровращающейся детали последовательно наносят растворы этиловых эфиров ортотитановой и ортокремниевой кислот, не выключая вращения шпинделя станка.

Детали с покрытиями проходят термообработку (упрочнение) при температуре $250\text{--}350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Максимальная температура нагрева дета-

лей должна быть на 30° ниже нижней границы отжига стекла данной марки. Осуществляется эта операция в термостатах по программе: нагрев, выдержка при определенной температуре и остывание. В результате термообработки свойства пленок стабилизируются, при этом показатель преломления и толщина пленки несколько уменьшаются.

К преимуществам данного способа следует отнести высокую производительность и простоту осуществления; получение пленок с высокой механической и химической прочностью. Недостатками являются ограниченные размеры деталей (10–260 мм), а также трудности обеспечения равномерности толщины пленки от центра к краю, особенно на деталях с малым радиусом кривизны и некруглой формы.

Способ нанесения покрытий восстановлением вещества из растворов (серебрение). Предварительно обработанные растворами кислоты, щелочи, двухлористого олова и промытые в дистиллированной воде заготовки, в частности призмы (рис. 6.2), укладывают на подставку в кювету 1 из винипласта и заливают смешанными в пропорциях 2:1 свежеприготовленными серебрющим и восстанавливающим растворами 2.

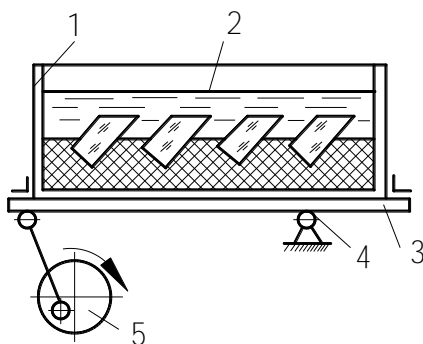


Рис. 6.2. Схема установки для нанесения зеркальных и светоделительных покрытий восстановлением серебра из раствора азотнокислого серебра

В состав серебрющего раствора входят азотнокислое серебро, натрий едкий, аммиак и 1%-й спиртовой раствор йода, а в восстанавливающий раствор – глюкоза. Растворяют вещества в дистиллированной воде.

При включении эксцентрикового механизма 5 стол 3 вместе с кюветой покачивается вокруг оси неподвижного шарнира 4. Про-

цесс длится 8–12 мин до полного восстановления серебра на поверхности деталей. В результате покачивания отработанный раствор замещается свежим, уменьшается вероятность воздушных пузырьков и осаждения посторонних частиц на поверхности серебряного слоя. Толщина покрытия зависит от продолжительности наращивания слоя серебра.

После серебрения детали тщательно промывают в дистиллированной воде и сушат. Серебро с нерабочих поверхностей снимают тампонами, смоченными в азотной кислоте. Как наружное покрытие, в процессе эксплуатации серебро быстро тускнеет, оно неустойчиво к влаге и непрочно (III–IV группа). При защите серебряного покрытия тонким слоем прозрачного бакелитового лака толщиной 2–4 мкм стойкость покрытия увеличивается (II группа), но коэффициент отражения снижается.

Способ получения покрытий травлением. Процесс травления заключается в обработке поверхности детали, изготовленной из стекла, содержащих кремнезем, слабым 0,5%-м раствором уксусной или азотной кислоты. Под действием разбавленной кислоты происходит удаление растворимых гидроокисей, солей и образование прозрачной пленки кремнезема SiO_2 с меньшим, чем у стекла, показателем преломления. Данный процесс используют для просветления деталей, имеющих большие габаритные размеры и массу или сложную форму поверхности. Пленка кремнезема, образовавшаяся при травлении, выполняет также функцию защитного покрытия, предохраняющего поверхность химически нестойких стекол от образования налетов.

При травлении деталь помещают в ванну из кислотоупорного материала таким образом, чтобы вся ее поверхность была покрыта раствором, и выдерживают определенное время, зависящее от химического состава стекла. Протравленные детали промывают дистиллированной водой, сушат и протирают мягкой салфеткой. Пленки получают механически прочными (0-I группа).

Способ получения покрытий методом пиролиза. Этот процесс осуществляется образованием пленки при воздействии на горячую поверхность подложки газообразных продуктов разложения солей металлов или полупроводниковых соединений при нагревании их до температуры плавления. Наиболее широко пиролиз применяется для получения прозрачных токопроводящих покрытий из двуокиси

олова SnO_2 . На рис. 6.3 представлена схема установки для осуществления этого процесса.

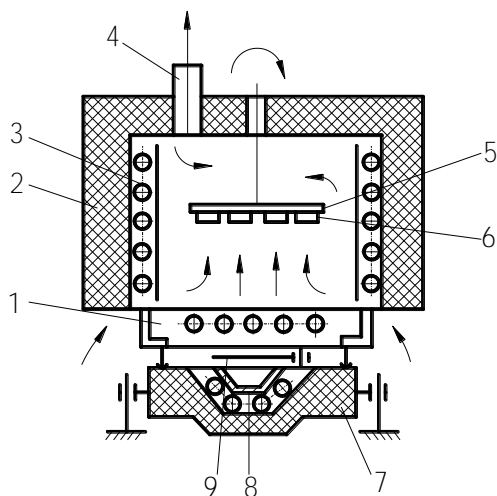


Рис. 6.3. Схема установки для нанесения покрытий методом пиролиза

Исходным пленкообразующим веществом является обезвоженное двухлористое олово SnCl_2 , разлагающееся при нагревании в присутствии влажного воздуха с выделением SnO_2 . Перед нанесением покрытия двухлористое олово смешивают по массе с 5–6 % фтористого аммония, добавляемого в качестве легирующей присадки для повышения электрической проводимости.

Подложки *6* закрепляют на диске *5*, который устанавливают в верхней части печи *2*, и разогревают с помощью электрического нагревателя *3* до температуры 375–420 °С в зависимости от марки стекла. Одновременно в испарителе *8* нагревают пленкообразующее вещество. Во время разогрева испаритель закрыт заслонкой *9*. После того как двухлористое олово расплавится, открывают заслонки и поднимают поддон *7* с испарителем к печи *2*. Пары двуокиси олова попадают в верхнюю часть и осаждаются на поверхности подложек. Непрореагировавшие газообразные продукты удаляются через вентиляционное отверстие *4* в печи потоком восходящего воздуха, поступающего из диффузора *1*.

В процессе пиролиза получают пленки толщиной 0,5–2 мкм. Однако этот процесс трудоемкий и не обеспечивает достаточно высокой воспроизводимости толщины покрытий и равномерности электрического сопротивления по площади подложки.

Способ аэрозольного получения покрытий. Его используют для получения прозрачных токопроводящих пленок путем распыления пленкообразующего раствора на нагретую подложку. В состав пленкообразующего раствора входят хлорное олово, фтористоводородная кислота, этиловый спирт и соляная кислота. Процесс осуществляется на полуавтоматической установке роторного типа, схема которой представлена на рис. 6.4.

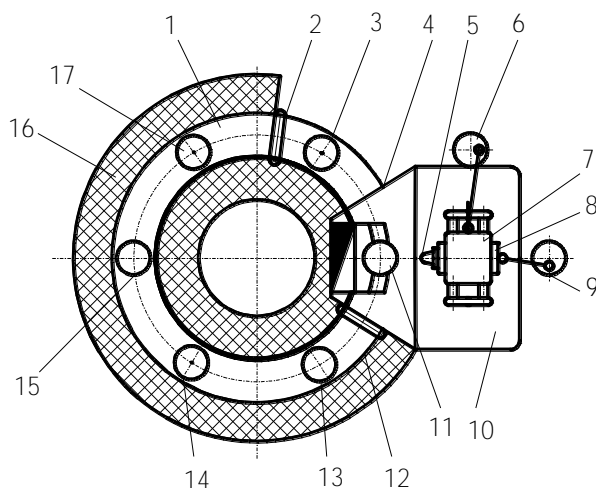


Рис. 6.4. Схема полуавтоматической установки для нанесения токопроводящих покрытий аэрозольным методом

Установка состоит из кольцевой печи 16 для нагрева заготовок, поворотной карусели 1 с шестью шпинделями и камеры напыления 10. Карусель периодически поворачивается на 1/6 оборота за цикл напыления.

Стеклянные подложки укладывают на графитовые поддоны шпинделей на позиции 3 (загрузка-выгрузка), открытой для подхода оператора, и разогревают их с помощью электрических нагревателей в кольцевом канале печи. В процессе разогрева шпиндели с подлож-

ками на позициях 17, 13–15 вращаются с частотой 30 мин^{-1} для улучшения равномерности нагрева подложек. На позиции 3 шпиндель не вращается. Горячая камера печи отделена от окружающего пространства и камеры распыления шибберными заслонками 2 и 12. Они поднимаются и опускаются автоматически с помощью пневмоцилиндров перед поворотом карусели.

Нагретые заготовки, поступившие в камеру распыления на позицию 17, подвергаются обработке струей пленкообразующего раствора, распыляемого форсункой 5. Во избежание попадания капель раствора на поверхность заготовки после окончания распыления сопло форсунки смещено за пределы площади заготовок. Форсунка установлена на двух подвижных каретках 7 и 8, совершающих возвратно-поступательное перемещение в двух взаимно перпендикулярных направлениях от кривошипно-шатунных механизмов 6 и 9. В сочетании с вращением подложки с заготовками это значительно повышает равномерность образующейся пленки по толщине. Продолжительность напыления составляет 3–18 с. Непопавшие на заготовки частицы раствора эвакуируются из зоны напыления через вентиляционные отверстия, расположенные под заготовкой, и через трубу 4.

6.2.2. Физические способы нанесения покрытий

Способ термического испарения вещества в вакууме. Это наиболее распространенный способ, при котором вещества термически испаряются в вакууме и конденсируются на поверхности подложек. Вакуум необходим для того, чтобы частицы пара вещества не претерпевали соударений с молекулами остаточных газов при движении к подложке и не изменяли прямолинейности траектории своего движения. Поэтому остаточное давление в вакуумной камере не должно превышать $(1,33 \dots 0,63) \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Способ термического испарения применяют для нанесения покрытий всех видов. В качестве пленкообразующих веществ используют химически чистые металлы, таблетированные или порошкообразные диэлектрики и полупроводниковые материалы, способные образовывать пленки с заданными оптическими свойствами и имеющие сравнительно невысокую температуру плавления.

На рис. 6.5 представлена схема вакуумной установки термического испарения.

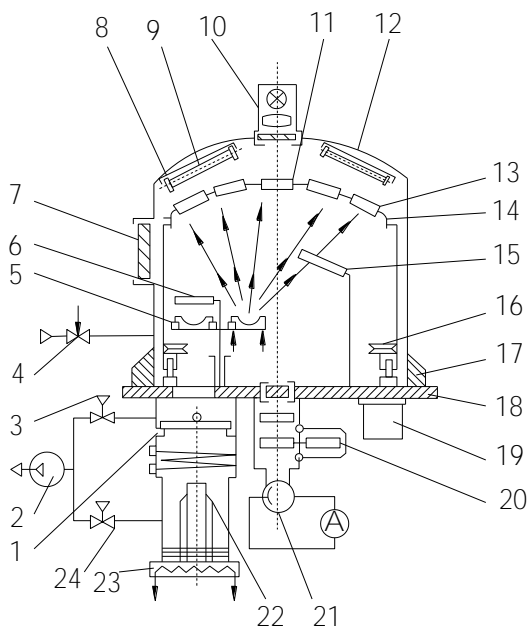


Рис. 6.5. Схема вакуумной установки нанесения покрытий методом термического испарения

Она состоит из камеры, закрытой от окружающей атмосферы подъемным металлическим колпаком 12, рабочей плиты 18, откачивающей вакуумной системы, подколпачного устройства для крепления напыляемых деталей и их вращения, испарителей 5 и пульта управления работой узлов и агрегатов установки. Для наблюдения за ходом процесса напыления в колпаке имеется иллюминатор 7.

При загрузке и выгрузке напыляемых деталей колпак с помощью винтового механизма или гидроцилиндра поднимается вверх и отводится в сторону, освобождая подколпачное пространство для работы оператора. В верхней части колпака установлены кварцевые лампы 9 с рефлекторами 8, обеспечивающие нагрев подложек перед напылением до температуры 100–320 °С, и осветитель 10 фотометрического устройства. Подогрев подложек улучшает адгезию и механическую прочность пленки. Место стыка колпака с плитой герметизируется резиновым уплотнением 17.

Система откачки воздуха состоит из форвакуумного насоса 2 предварительной откачки, диффузионного высоковакуумного насоса 22, системы клапанов, ловушек и трубопроводов. Для разгерметизации колпака по окончании процесса служит кран-натекатель 4.

Напыляемые подложки 13 и образец-свидетель 11 для контроля толщины пленки в процессе напыления устанавливают в отверстия приспособления 14. Для улучшения равномерности толщины пленки приспособление вращается с частотой 20–100 мин⁻¹ на роликовых опорах. Привод вращения приспособления осуществляется через конический ролик 16 и бесконтактную электромагнитную муфту 19, расположенную на рабочей плите установки.

Загрузка пленкообразующего вещества осуществляется в металлические контейнеры небольшого объема (0,2–3 см³). Разогревают вещество за счет выделения теплоты при прохождении через контейнер электрического тока большой силы. Материал контейнера не должен расплыться вместе с пленкообразующим веществом во избежание загрязнения покрытий и изменения их свойств, а также не должен вступать в химические реакции с пленкообразующим веществом.

Для изготовления испарителей используют тугоплавкие металлы, в частности, вольфрам и молибден. Контейнеры из этих металлов (рис. 6.6, а) допускают нагрев до 1800 и 1400 °С соответственно.

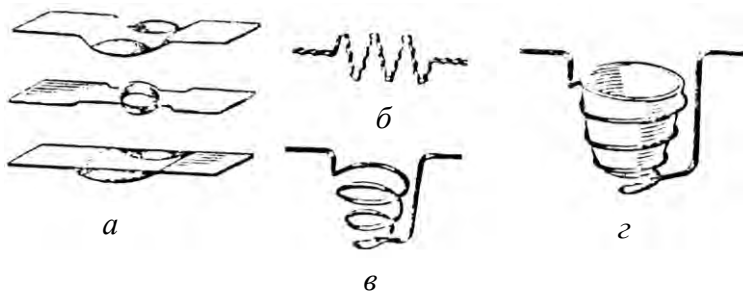


Рис. 6.6. Конструкции контейнеров-испарителей пленкообразующего вещества в вакууме: а – из листового материала; б – спираль; в – коническая спираль; г – керамический тигель

При испарении металлов металлическую фольгу или кусочки проволоки надевают на витки спирали испарителя (рис. 6.6, б) или помещают в коническую чашечку, образованную навивкой спирали (рис. 6.6, в). Спираль изготавливают из молибденовой проволоки

диаметром 0,8 – 1 мм. Тигли из металла, графита, тугоплавких окислов (рис. 6.6, з) применяют для испарения веществ в больших количествах. Нагревают тигли тепловым излучением спирали из тугоплавких металлов.

Испарение пленкообразующего вещества начинают при достижении внутри камеры заданного разрежения воздуха. Предварительно испаряют внешний загрязненный слой вещества, экранируя поток частиц поворотной заслонкой б (см. рис. 6.5). Затем заслонку поворачивают, и молекулы напыляемого вещества направляются к подложкам. Толщину покрытия или связанные с ней коэффициенты пропускания контролируют на образце-свидетеле с помощью фотометрического устройства.

Многослойные покрытия наносят поочередно, испаря вещества из отдельных элементов испарителя. Последний выполнен в виде револьверного устройства, позволяющего вводить в зону распыления контейнера с различными веществами и подключать их к контактам электрической цепи.

Разгерметизация камеры осуществляется открытием крана-нагревателя 4 (см. рис. 6.5) воздуха после выключения высоковакуумного насоса 22 при закрытых клапанах 1 и 3.

Термическим испарением в вакууме получают все типы оптических покрытий из большого числа веществ с различными свойствами. Процесс высокопроизводителен, что позволяет наносить на детали многослойные покрытия с заданными стабильными свойствами. К недостаткам процесса можно отнести ограничение по использованию тугоплавких материалов в качестве пленкообразующих веществ, что сужает область выбора покрытий.

Способ электронно-лучевого испарения вещества в вакууме. При воздействии сфокусированного мощного пучка ускоренных электронов на поверхность пленкообразующего вещества происходит его нагрев и испарение. С помощью электронно-лучевого испарения возможен локальный нагрев вещества до 5000 °С, что позволяет испарять тугоплавкие окислы SiO₂, TiO₂ и др.

В качестве примера на рис. 6.7 приведена принципиальная схема одного из вариантов построения испарительных установок для нанесения покрытий.

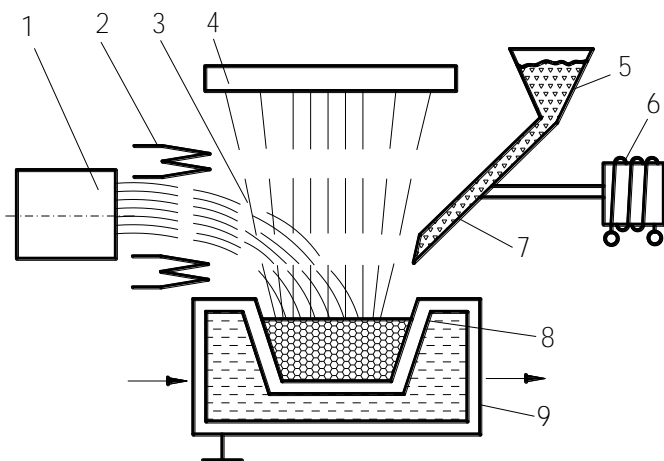


Рис. 6.7. Принципиальная схема электронно-лучевой установки нанесения покрытий

Испаряемый материал из бункера 5 по желобу 7, приводимому в действие вибратором 6, порциями попадает в охлаждаемый тигель 9. Траектория электронного луча 3, получаемого с помощью электронной пушки 1, посредством отклоняющей системы 2 искривляется в направлении испаряемого вещества 8. В результате воздействия электронного луча на поверхность материала последний испаряется и частицы пара, поднимаясь вверх, оседают на поверхности подложки 4, образуя на ней плотную пленку. Применение отклоняющего магнитного поля позволяет располагать электронную пушку 1 практически в любом удобном месте, при этом угол поворота луча может достигать 270° .

С целью равномерного испарения вещества под большими углами и без брызг сфокусированный пучок электронов диаметром 5–8 мм сканируют с частотой до 50 Гц по полю размером до 30×30 мм. Пленки получают чистые и однородные, т. к. стенки водоохлаждаемого тигля не соприкасаются с расплавленным веществом. Работа с электронно-лучевыми испарителями требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

Помимо рассмотренного существует множество других вариантов схем испарения, например, многотигельное испарение, когда на

одну подложку наносят покрытие сложного состава параллельно из нескольких тиглей. В этом случае подложку располагают в месте перекрещивания потоков испаряемых материалов. Возможно также осуществлять испарение разных веществ из одного тигля, когда в него подают материалы из нескольких бункеров.

Способ нанесения покрытий катодным распылением вещества. Способ основан на явлении медленного разрушения (распыления вещества) катода под действием ударяющихся о него атомов или молекул инертного газа, ионизированных электрическим разрядом между электродами при давлении около $0,13$ Па. Свободные атомы или молекулы вещества покидают его поверхность и осаждаются на противостоящих катоду поверхностях.

Установка катодного распыления (рис. 6.8) представляет собой вакуумную камеру, по конструкции аналогичную камере термического распыления, но с меньшей высотой.

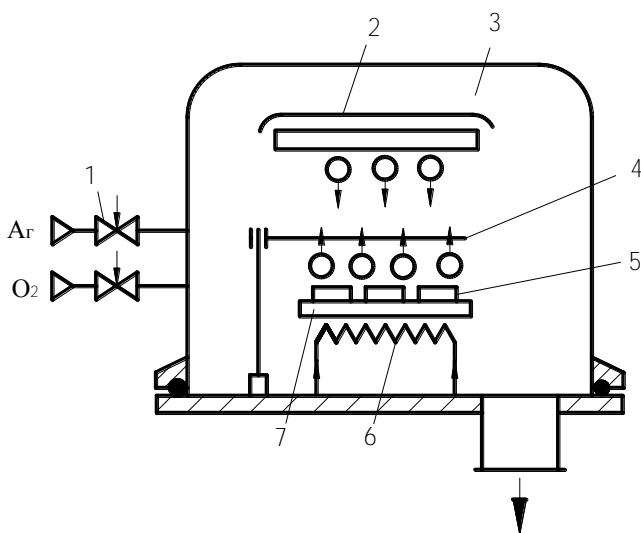


Рис. 6.8. Схема установки для катодного распыления

Внутри камеры расположены катод 2, анод 7, поворотный экран 4 и нагреватель подложек 6. После откачки воздуха из вакуумной камеры до давления остаточных газов $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па во внутреннюю по-

лость 3 напускают через натекатель 7 инертный газ-аргон до давления 0,13 Па. Плазму получают при разности потенциалов катода и анода 3–5 кВ. Катод изготавливают из пленкообразующего вещества, при этом размеры катода должны быть на 10–20 % больше размеров подложек. Предварительно подложки 5 нагревают до температуры, не превышающей 300 °С.

Катодным распылением наносят пленки металлов, диэлектриков, в том числе тугоплавких веществ. В атмосфере активного газа (кислород + аргон) получают пленки окислов металлов. В этом случае наряду с физическими процессами распыления вещества одновременно происходят химические реакции на катоде и в газовой фазе с образованием оксидной пленки. Способ нанесения пленок в присутствии активных газов получил название реактивного катодного распыления.

Достоинства способа заключаются в универсальности – возможности получения прочных пленок, в том числе из тугоплавких веществ; в минимальном расходе материалов, что особенно важно при изготовлении покрытий из драгоценных металлов – золота, платины.

Список литературы

1. Технология изготовления очков: учебник / Л.С. Урмахер [и др.]; под ред. Л.С. Урмахера. – М.: Медицина, 1990. – 320 с.: ил.
2. Хацевич, Т.Н. Медицинские оптические приборы: учебное пособие: в 2 ч. / Т.Н. Хацевич. – Новосибирск: СГГА, 1998 – 2002. – Ч. 1: Физиологическая оптика. – 98 с.
3. Хацевич, Т.Н. Эндоскопы: учебное пособие / Т.Н. Хацевич, И.О. Михайлов. – Новосибирск: СГГА, 2002. – 196 с.
4. Сергиенко, Н.М. Офтальмологическая оптика / Н.М. Сергиенко. – М.: Медицина, 1991. – 143 с.
5. Офтальмологическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения величин: ГОСТ 14934–80. – Введ. 01.07.89. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 24 с.
6. Линзы очковые. Общетехнические условия: СТБ ГОСТ Р 51044–99. – Введ. 01.10.99. – Минск: Госстандарт, 1999. – 16 с.
7. Линзы контактные. Термины и определения: ГОСТ 28956–91 (ИСО 8320–86). – Введ. 01.07.92. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 16 с.
8. Эндоскопы медицинские. Термины и определения: ГОСТ 18305–83. – Введ. 01.01.85. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
9. Эндоскопы медицинские. Общие технические требования и методы испытаний: ГОСТ 23496–89. – Введ. 01.01.91. – М.: Изд-во стандартов, 1991.
10. Лютинская, А.П. Принципы коррекции зрения: учебное пособие для студентов, техникумов-оптиков и консультантов оптических салонов / А.П. Лютинская, С.Н. Михайлова. – 2007. – 96 с.: ил.
11. Керник, Н.Ю. Современные технологии изготовления средств коррекции зрения: учебное пособие / Н.Ю. Керник. – 2007. – 144 с.

Оглавление

Глава 1. Оптические детали и изделия для коррекции зрения	3
1.1. Основные сведения о системе зрения человека и строении глаза	3
1.2. Принцип коррекции недостатков глаза очковыми линзами	5
1.3. Классификация очковых линз	10
Глава 2. Технология изготовления стеклянных очковых линз	14
2.1. Основные сведения о процессах шлифования и полирования поверхностей стеклянных заготовок	16
2.2. Формообразование сферических поверхностей	19
2.3. Вспомогательные операции в технологии изготовления очковых линз	22
2.4. Способы обработки асферических поверхностей и астигматических линз	25
2.5. Способы изготовления призматических очковых линз	28
2.6. Способы изготовления бифокальных линз	30
Глава 3. Технология изготовления очковых оправ	34
3.1. Основные сведения об очковых оправках и их классификация	34
3.2. Технология изготовления металлических очковых оправ ...	38
3.2.1. Технология изготовления деталей очковых оправ	38
3.2.2. Сборка металлических очковых оправ	42
3.2.3. Окончательная сборка металлических очковых оправ	42
3.2.4. Сборка и юстировка очков	43
3.3. Технология изготовления пластмассовых и комбинированных очковых оправ	44
3.3.1. Изготовление пластмассовых оправ методом механической обработки	44
3.3.2. Изготовление пластмассовых оправ методом литья под давлением	48

Глава 4. Технология изготовления контактных и интраокулярных линз	51
4.1. Основные сведения о контактных линзах	51
4.2. Требования, предъявляемые к материалам контактных линз	55
4.3. Технология изготовления жестких контактных линз	58
4.4. Технология изготовления мягких контактных линз	63
4.5. Технология изготовления интраокулярных линз	64
4.5.1. Основные сведения об интраокулярных линзах	64
4.5.2. Способы изготовления интраокулярных линз	71
4.5.3. Основные этапы операции по замене хрусталика глаза	76
 Глава 5. Производство элементов и систем волоконной оптики, применяемых в медицинских эндоскопах	79
5.1. Основные сведения о медицинских эндоскопах с волоконной оптикой	79
5.2. Распространение света в оптических волокнах и волоконно-оптических пучках	82
5.3. Основные элементы эндоскопов с волоконной оптикой. Волоконно-оптические жгуты	85
5.4. Изготовление волоконно-оптических жгутов	87
5.4.1. Материал для изготовления световодов	87
5.4.2. Способы изготовления одножильных световодов	88
5.4.3. Изготовление гибких волоконных жгутов	94
5.5. Механические системы управления эндоскопом	96
5.5.1. Конструкции гибкой части эндоскопа	97
5.5.2. Механизм управления гибкой частью эндоскопа	100
 Глава 6. Покрытия оптических деталей	102
6.1. Типы покрытий и их свойства	102
6.2. Способы нанесения покрытий	107
6.2.1. Химические способы нанесения покрытий	107
6.2.2. Физические способы нанесения покрытий	113
 Список литературы	120

Учебное издание

КИСЕЛЕВ Михаил Григорьевич
ГАБЕЦ Вячеслав Леонидович
ДРОЗДОВ Алексей Владимирович
СТЕПАНЕНКО Дмитрий Александрович

ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, ИЗДЕЛИЙ
И СИСТЕМ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-38 02 02 «Биотехнические
и медицинские аппараты и системы»

Редактор Е.О. Коржуева
Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

Подписано в печать 15.06.2011.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 7,15. Уч.-изд. л. 5,59. Тираж 100. Заказ 1207.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.