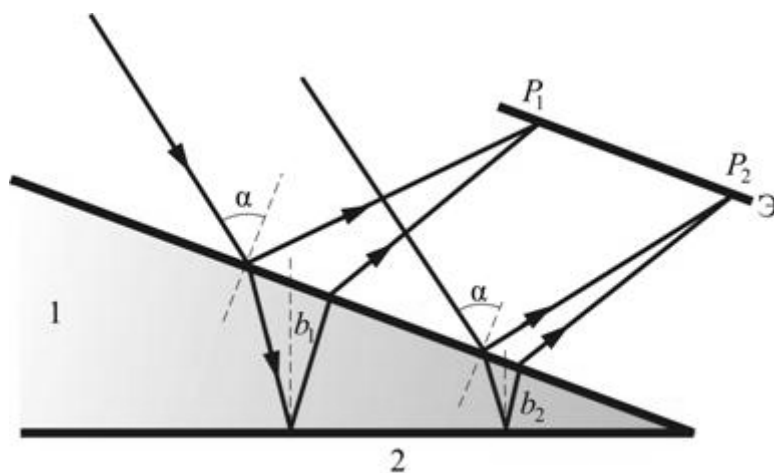


Л.А. Губанова, Ю.А. Константинова  
**ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Учебно-методическое пособие



Санкт-Петербург

2018

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Л.А. Губанова, Ю.А. Константинова**

## **ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО по направлениям подготовки 12.03.02 «Оптотехника», 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» и 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования бакалавриата и магистратуры

**Учебно-методическое пособие**



**Санкт-Петербург**

**2018**

УДК 681.2.002

**Губанова Л.А., Константинова Ю.А.** Оптические технологии. Учебно-методическое пособие – СПб: Университет ИТМО, 2018. - 62 с.

**Рецензент:** Михайлов А.В., к.т.н., начальник научно-технологического отделения – главный технолог АО «ГОИ им. С.И. Вавилова»

Методическое пособие к проведению практических занятий по курсу «Оптические технологии и материалы» и «Современные технологии формообразования» содержит сведения об отличительных признаках оптического бесцветного стекла и ряда оптических материалов с особыми свойствами, их параметрами и спектральными характеристиками.

В пособие рассмотрены вопросы, связанные с технологией обработки оптического материала, формообразованием оптических поверхностей и получением расположения преломляющих поверхностей согласно требованиями, указанным в чертеже. Представленная в пособии информация является базовой для решения задач, связанных с расчётом энергетических и спектральных характеристик оптических элементов, изготовленных из различных оптических материалов. В пособии приводится информация о некоторых технологических операциях формообразования оптических деталей. Здесь же приводятся примеры решения задач, связанные с изготовлением оптических элементов. Представленные примеры решения задач должны помочь обучающимся в освоении ряда дисциплин, связанных с формообразованием оптических элементов.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям 12.03.02 «Оптехника», 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» и 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» при изучении дисциплин «Оптические технологии и материалы», «Технология обработки материалов», «Технология обработки и контроля оптических материалов», «Современные способы формообразования».



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2018

© Л.А. Губанова, Ю.А. Константинова, 2018

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	5
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №1. Определение изменения интенсивности излучения при прохождении его через клин, выполненный из бесцветного стекла</b>	8
1.1 Отличительные признаки оптического стекла	9
1.2 Типы и марки оптических стекол	9
1.3 Показатели качества бесцветного оптического стекла	10
1.4 Физико-химические свойства оптического стекла	13
1.5 Спектральные характеристики стекол	14
1.6 Пример	16
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2. Расчет свето-технических характеристик плоскопараллельной пластины, выполненной из цветного стекла</b>	19
2.1 Цветное стекло	19
2.2 Характеристики светофильтров	19
2.3 Виды светофильтров	20
2.4 Пример	21
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №3. Определение коэффициента фотохромности</b>	23
3.1 Фотохромные стекла	23
3.2 Пример	25
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №4. Оформление чертежа на оптический элемент</b>	26
4.1 Требования к материалу	26
4.2 Требования к точности изготовления	26
4.2.1 Допуски на отклонения радиусов сферических поверхностей	27
4.2.2 Допуски на взаимное расположение поверхностей	28
4.2.3 Чистота полированных поверхностей	29
4.2.4 Расчетные параметры детали	30
4.3 Анализ чертежа оптической детали	30
4.4 Пояснения к выполнению чертежа и расчета оптической детали	34
4.5 Пример	38
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №5. Определение габаритов заготовки оптической детали</b>	41
5.1 Формирование размера и выбор вида заготовки линз	41
5.2 Пример	43

<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №6. Пооперационное распределение припуска на механическую обработку заготовок линз и пластин</b>	45
6.1 Предварительное шлифование	45
6.2 Тонкое шлифование и полирование	46
6.3 Пример	46
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №7. Расчет расположения оптических элементов на плоском и сферическом блоках</b>	49
7.1 Расчет плоского блока	49
7.2 Расчет сферического блока	50
7.3 Определение параметров наклеечного приспособления	52
7.4 Пример №1	52
7.5 Пример №2	54
<b>ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №8. Определение габаритов фасок, изготавливаемых на оптических элементах</b>	57
8.1 Центрирование линз	57
8.2 Фасетирование линз	58
8.3 Пример	58
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	60

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение оптических приборов и методов исследования в различные области науки и техники приводит к необходимости изучения всех свойств оптических материалов и технологии формообразования их преломляющих и отражающих поверхностей, а также создания новых технологий, направленных на увеличение производительности изготовления оптических элементов.

К оптическим материалам, используемым в передающих трактах оптических и оптико-электронных устройств, отличающихся сложностью схемных решений, предъявляется ряд специфических требований. В первую очередь – это широкий спектральный диапазон, используемый для передачи информации. Долгое время основная информация в оптических приборах передавалась только в видимой области спектра, скорее все поэтому оптические бесцветные стёкла разрабатывались таким образом, что их область прозрачности лежала в интервале длин волн 380нм -2400нм. В дальнейшем появились оптические материалы (кварцевое оптическое стекло), прозрачные в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной области спектра. К одним из первых изготовленных оптических стёкол относятся цветные стекла, которые долгое время использовались лишь в качестве декоративных, но в последнее столетие их часто используют для коррекции состава передаваемого излучения, т.е. устранения из состава проходящего излучения некоторого спектра.

Возрастающий интерес к работе в инфракрасной области спектра приводит к тому, что в качестве материалов для оптических элементов используются инфракрасные оптические стекла и кристаллы, как природные, так и искусственно выращенные. Кристаллы обладают рядом физико-химических особенностей, которые следует учитывать как при формообразовании оптических элементов, так и при эксплуатации оптических систем, в состав которых входят такие детали.

Появление новых направлений в оптике, таких как лазерная, волоконная оптика, голография, интегральная оптика, привело к созданию принципиально новых оптических и оптико-электронных устройств, отличающихся сложностью схемных решений, использующих оптические материалы с неизвестными ранее свойствами. К таким материалам относятся фотохромные стёкла, ситаллы, поликристаллы и ряд других, процесс разработки стёкол с особыми свойствами продолжается и в настоящее время.

Требования, как к качеству материалов, так и к точности конструктивных параметров оптических элементов постоянно возрастают. Требования к светотехническим характеристикам оптических элементов изображаются на чертежах. Следует помнить, что чертежи оптических элементов имеют ряд отличий от других чертежей, на которых изображены детали. На этих чертежах указываются требования допустимые категории и классы нормируемых параметров оптических материалов, из которых изготавливаются оптические элементы, светотехнические требования к качеству поверхности и точности изготовления формы и взаимного расположения преломляющих и отражающих

поверхностей, а также контролируемые выходные характеристики оптических элементов.

Вместе с тем оптическая технология имеет ряд специфических особенностей. Одна из них, в частности, заключается в том, что допуски на основные конструктивные параметры оптических элементов, в отличие от деталей из других конструкционных материалов, связаны с волновой природой света. Согласно критерию Релея, для обеспечения высокого качества изображения, волновые aberrации оптической системы не должны превышать  $\lambda/4$ . Рассчитываемые исходя из этого допуски на параметры элементов оказываются на 1-3 порядка выше по сравнению с назначаемыми на детали из конструкционных материалов. Такие точности не могут быть достигнуты с помощью традиционных методов обработки, используемых в технологии приборостроения (точение, хонингование и др.). Единственным способом их обеспечения в настоящее время является поверхностный притир. При всей внешней простоте это сложный пограничный процесс, в котором участвует большое число технологических факторов требующих квалифицированного управления формообразованием. Высокие требования к точности оптических элементов определяют необходимость использования прецизионных средств технологического контроля - интерференционных, фотоэлектрических, автоколлимационных, голографических, теневых и других.

Специфика процессов механической обработки во многом определяется физико-химическими свойствами оптических материалов, которые отличаются хрупкостью, широким диапазоном твердости (от относительно мягких до близких к твердости алмаза), различной химической устойчивостью, вплоть до разрушаемых влагой атмосферы, способностью к упругой деформации при малых нагрузках. Некоторые имеют низкую термостойкость и могут разрушаться при незначительном температурном градиенте. Эти особенности свойств оптических материалов также усложняют процессы формообразования, ограничивают, а во многих случаях и исключают, использование традиционных для технологии приборостроения обрабатываемых и вспомогательных материалов, инструмента, способов закрепления заготовок и других.

Процесс формообразования оптических деталей часто состоит из нескольких этапов, каждый из которых включает в себя переходы, изменяющие габариты деталей, поэтому определение габаритов заготовок оптической детали является достаточно специфической операцией.

При формообразовании оптических деталей используются различные инструменты и абразивы, вследствие чего необходимо рассчитывать размер заготовки для каждой операции с учётом величины удаляемого с заготовки материала. Расчёт осуществляется для каждой операции (предварительное шлифование, тонкое шлифование и полирование).

Оптические элементы редко обрабатываются индивидуально, за исключением крупногабаритных деталей. Обычно одновременно обрабатывается несколько оптических элементов одной формы и размеров из одного материала, как при мелкосерийном, так массовом производстве. Для

этого положение оптические элементы фиксируется заданным способом на определённом приспособлении, такая фиксация деталей называется «сборка блока». Перед сборкой необходимо рассчитать расположение деталей на приспособлении для того, чтобы съём материала осуществлялся одинаково со всех деталей, и абразивы и смазочно-охлаждающая жидкость равномерно распределялась по всем поверхностям.

Завершающей операцией формообразования является стачивание углов, которые образуются между поверхностями оптического элемента. Эта операция необходима для уменьшения напряжения в оптическом материале.

С усложнением оптических систем изменились и конструктивные формы поверхностей деталей. Появился класс деталей с несферическими поверхностями - параболическими, гиперболическими, коническими и др. Особенность таких поверхностей заключается в наличии у них максимум одной оси симметрии, что не позволяет использовать обработку методом притира в его классическом виде и существенно усложняет процесс формообразования. Возникает необходимость программирования износа по зонам поверхности. При этом для каждого типа поверхности, как сами программы, так и пути их реализации различны. Для формирования таких поверхностей и решения ряда других технологических задач используют физические методы обработки оптических материалов, в частности ионное полирование деталей в вакууме.

Многие компоненты оптических систем состоят из нескольких соединённых вместе деталей. Соединение осуществляют способами, которые отличаются от применяемых в технологии приборостроения. Для этой цели используют склеивание специальными (оптическими) клеями, действие сил молекулярного сцепления, химическое взаимодействие поверхностных слоев и др.



## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ № 1.**

### **Определение изменения интенсивности излучения при прохождении его через клин, выполненный из бесцветного стекла**

#### **Оптические материалы**

При конструировании оптической системы материал, используемый для изготовления передающих и отражающих элементов, рассматривают с точки зрения тех свойств, которые обеспечивают выполнение прибором его функциональной задачи. К этим свойствам относятся: прозрачность в рабочей области спектра, величина оптических постоянных – показателя преломления, средней дисперсия и др. Принцип работы ряда оптических систем основан на взаимодействии оптического элемента со световым потоком или другим видом электромагнитного поля. От оптических материалов для таких систем требуется способность генерировать когерентное излучение, изменять светопропускание в зависимости от интенсивности светового потока, находясь в магнитном поле вращать плоскость поляризации светового излучения, а в электрическом поле обладать двойным лучепреломлением. Также необходимо, чтобы рассматриваемые материалы были механически изотропны, обладали высокой поверхностной твердостью, устойчивостью по отношению к реагентам, воздействию которых они подвергаются в процессе обработки и т.п.

В процессе эксплуатации прибора оптические элементы должны быть устойчивы к воздействию окружающей среды – высокой влажности атмосферы, морской воды, гамма – нейтронного облучения. При конструировании некоторых приборов, работающих в условиях динамических нагрузок, вибрации, теплового удара, учитываются факторы, которые вызывают появление на полированных поверхностях дефектов (царапины, выколки, трещины). Следовательно, необходимо, чтобы рассматриваемые материалы имели высокую механическую прочность.

Все эти свойства невозможно сочетать в одном веществе, поэтому используются различные типы оптических материалов. Практически все они относятся к неорганическим средам, и делятся на следующие основные виды:

- 1) Оптическое бесцветное стекло,
- 2) Оптические монокристаллы,
- 3) Оптическое цветное стекло,
- 4) Оптические поликристаллы,
- 5) Оптическое кварцевое стекло,
- 6) Оптическая керамика,
- 7) Оптические ситаллы,
- 8) Оптические стекла с особыми свойствами.

## Бесцветное оптическое стекло

### 1.1 Отличительные признаки оптического стекла

Оптическим называют однородное стекло любого химического состава, которое обладает постоянством свойств во всей своей массе и их повторяемость от плавки к плавке.

Одним из главных отличительных признаков оптического стекла от промышленных стекол является однородность. Достигают ее специальными приемами механического перемешивания стекломассы во время варки и термической обработкой готового стекла – тонким оптическим отжигом.

Следующим отличительным признаком оптического стекла считается прозрачность. Высоким качеством обладают стекла, показатель ослабления которых менее  $4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , для некоторых систем такое качество неудовлетворительно, в этом случае применяются стекла с показателем ослабления  $(1-2) \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ . Для волоконно-оптических линий необходимы сверхпрозрачные стекла ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$  и менее).

Третьим отличительным признаком оптических стекол является широкий интервал значений показателя преломления – от 1,44 до 2,35 и строгая воспроизводимость его величины независимо от времени и места изготовления стекла.

### 1.2 Типы и марки бесцветного оптического стекла

Бесцветное стекло делится на две группы – кроны и флинты, в свою очередь внутри каждой группы стёкла делятся на типы, а типы делятся на марки. В основу классификации положены значения показателя преломления и коэффициента дисперсии оптических бесцветных стёкол. Признаком принадлежности к тому или иному типу является положение стекла на диаграмме  $n_e - v_e$  (рис.1.1). Участки стекол одного типа, как правило, ограничены предельным содержанием главных компонентов, а именно ВаО и  $Al_2O_3$  для кронов (К) и РbО для флинтов (Ф). Только стекла особых кронов (ОК) и особых флинтов (ОФ) могут располагаться на разных участках соответственно кронов и флинтов. Каждому стеклу определенного химического состава присвоена марка, состоящая из обозначения типа и порядкового номера разработки, например, К8, ТК14, Ф5, СТК12 и др.

Основную массу в объеме всего перерабатываемого бесцветного стекла составляет стекло марки К8. По статистике из общей номенклатуры оптических стекол около 80% объема производства относится всего к 10 маркам, 10% к другим 10, менее используемым. Остальные 10% соответствуют выпуску более чем 70 марок.

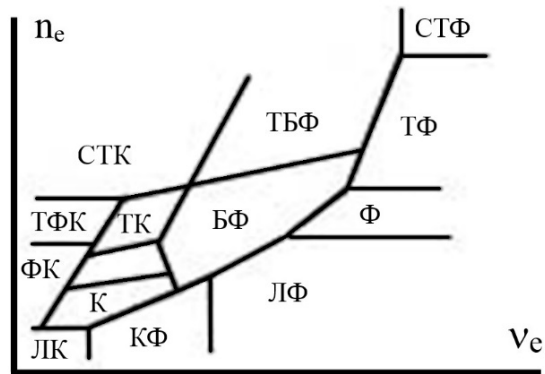


Рисунок 1.1 - Диаграмма «показатель преломления» - «коэффициент дисперсии»

### 1.3 Показатели качества оптического бесцветного стекла

Стекло одной марки, но разных партий варок может отличаться от установленных для него значений **показателя преломления  $n_e$**  и **средней дисперсии  $n'_F - n'_C$** . Несоответствие фактических значений расчетным приводит к возникновению aberrаций, исправление которых при конструировании оптической системы было сделано по номинальным значениям оптических постоянных. Более того, у линз изменяются фокусные расстояния и отрезки, что усложняет, иногда и исключает, возможность юстировки прибора. По величине отклонений  $n_e$   $n'_F - n'_C$  и ОСТ 3-3514-85 предусматривает 5 категорий оптического бесцветного стекла.

У оптических бесцветных стёкол нормируют также **однородность партии по показателю преломления и средней дисперсии**, то есть степень равенства их значений у всех заготовок. Установлены 4 класса однородности партии по показателю преломления и 2 класса однородности по средней дисперсии.

Практически ни одно стекло нельзя сварить без пузырей. Пузыри представляют собой замкнутые полости в стекле, заполненные газом различной степени разрежения, или включающие в себя неоднородный материал. Состав газов зависит от химического и шихтного состава стекол и условий варки. Существует несколько источников образования пузырей: химические реакции, протекающие при термическом разложении сырьевых шихтных материалов, сам материал сосуда для варки, попадание в стекломассу инородных тел (кусочки керамики, частицы сажи).

**Пузырность** характеризуется диаметром наибольшего пузыря в заготовке и средним числом пузырей в 1 кг сырьевого стекла. Размер максимального пузыря существенен с точки зрения его видимости, а число пузырей с точки зрения вероятности из вскрытия на поверхности детали при формообразовании оптического элемента. Выделяют 9 категорий пузырности по размеру пузырей (1,1а,2,3...8). Также в зависимости от среднего числа пузырей диаметром более 0,03 мм в 1 кг сырьевого стекла предусмотрены 6 классов (А, Б...Е).

Пузыри вносят ряд дефектов в работу оптического прибора, в частности вызывают рассеяние света, образование местных ошибок, что не позволяет

наносить на поверхность детали рисунок, портят чистоту зрения, активные тела лазеров при наличии включений разрушаются в процессе накачки.

Для снятия напряжений внутри стекла, возникающих при остывании заготовок, используется операция тонкого отжига. Эта операция состоит из 4 этапов, заключительным является ответственное охлаждение. На этапе ответственного охлаждения отжигаемого стекла, в нем, из-за неизбежных перепадов температуры между внутренними и наружными областями, возникают напряжения. После охлаждения до комнатной температуры, внутренние области оказываются под действием растягивающих, а внешние – сжимающих напряжений. Если температура стекла постоянна, то напряжения не меняются. Поэтому они носят название постоянных или остаточных.

Напряженное состояние стекла вызывает **двойное лучепреломление**. Оценивают его по разности хода обыкновенного и необыкновенного лучей поляризованного света отнесенной к единице (1 см) толщины стекла. Разность хода является мерой остаточных напряжений. Вместе с тем она характеризует качество отжига стекла.

Связь между двойным лучепреломлением и напряжениями устанавливается через коэффициент пропорциональности  $B$  – оптический коэффициент напряжения (ОКН). У стекол разных марок ОКН различен. Поэтому при равных остаточных напряжениях величина двойного лучепреломления может быть неодинаковой.

Остаточные напряжения в стекле являются источником оптической неоднородности и вызывают деформацию поверхностей заготовок в процессе механической обработки. Двойное лучепреломление способно вызвать двоение изображения подобно одноосному кристаллу, величина двоения будет невелика, а также искажение волнового фронта.

По величине двойного лучепреломления, с учетом ОКН, стекло серии «0» по ГОСТу 3514-94, разделено на пять категорий (1-5). Выбор категории определяется требованиями к оптической однородности и точности формы поверхности детали. Например, стекло 1-й категории используют для изготовления объективов микроскопов, где должна быть исключена деформация поверхностей, вызываемая остаточными напряжениями, а стекла 3-5 категории используют для изготовления сеток, шкал, лимбов, где требования к точности формы поверхностей низкие, так как детали работают в узком пучке света.

Перемешивание стекломассы в процессе варки не обеспечивает её однородности. В расплаве образуются потоки, направленные так, что вдоль оси сосуда стекломасса поднимается вверх, захватывая пограничные слои с поверхности и стенок сосуда и в результате образуются химические неоднородности, называемые свилими. Свили представляют собой тонкие прослойки стекла, которые отличаются от остальной массы химическим составом, а, следовательно, и величиной показателя преломления. Так как эта разность мала, то невооруженным глазом свили не видны. Установлены 2 категории **свильности**, различающиеся условиями контроля и 2 класса (А и Б), различающиеся числом направлений просмотра заготовки. Класс А

предусматривает два взаимно перпендикулярных направлений просмотра, класс Б – одно. Свилы вызывают деформацию волнового фронта, проходящего через деталь, нарушают чистоту поля зрения, могут стать источником разрушения детали, вызывают астигматизм.

Также нормируется **оптическая однородность стекла**, которая характеризует степень постоянства показателя преломления в объеме материала заготовки. При постоянной температуре и данной длине волны излучения, показатель преломления должен быть одинаков в каждом элементарном объеме стекла. Непостоянство данной характеристики стекла вызывает деформацию волнового фронта, следствием которой является снижение разрешающей способности системы, ухудшение качества изображения. Критерием оценки однородности стекла размером до 250 мм по величине разрешающей способности является численное значение угла  $\varphi$  разрешения дифрактометра, в параллельный пучок которого введена заготовка, к теоретическому углу  $\varphi_0$  разрешения самой установки (ГОСТ 3518-80). В зависимости от величины этого отношения стекло разделено на 5 категорий (1-5).

Распространение регулярного светового потока, вошедшего в стекло, сопровождается его последовательным ослаблением. Отношение потока  $\Phi_x$ , прошедшего пути «х» к потоку  $\Phi_0$  в начале пути называют коэффициентом пропускания:

$$\tau_x = \frac{\Phi_x}{\Phi_0}. \quad (1.1)$$

Коэффициент пропускания подчиняется показательному закону, то есть:

$$\tau_x = e^{-\varepsilon x}, \quad (1.2)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов,  $\varepsilon$  – натуральный показатель ослабления, характеризующий данное стекло. Численное значение показателя ослабления  $\varepsilon$  (в  $\text{см}^{-1}$ ) показывает долю светового потока, теряющегося при прохождении им слоя стекла толщиной 1 см.

Если  $\varepsilon \ll 1$ , то после разложения показательной функции в ряд можно принять:

$$\tau_x = 1 - \varepsilon x. \quad (1.3)$$

**Ослабление светового потока** вызывают два независимых и по существу разных явления – поглощения и рассеяние. Поглощение заключается в том, что часть потока, проходящего через стекло необратимо переходит в собственную энергию атомов и молекул и, в итоге, в тепло.

Рассеяние заключается в том, что часть энергии регулярного светового потока, который распространяется по законам геометрической оптики непрерывно уходит в виде диффузного потока, распространяясь по всем направлениям. Оно является следствием микронеоднородностей среды, то есть неодинаковой величиной показателя преломления участков, находящихся на расстояниях, сравнимых с длиной волны или меньших её. Рассеяние света понижает яркость изображения и создает фон, который снижает контрастность изображения.

Потери света в стекле нормируют через показатель ослабления  $\epsilon_A$ , представляющий собой величину, обратную расстоянию, на котором потом излучения от источника А, образующего параллельный пучок, ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз. Установлено 8 категорий (1 - 8), характеризующихся показателем ослабления.

#### 1.4 Физико-химические свойства оптического стекла

Трудоемкость процесса механической обработки определяет твердость стекла. С одной стороны, чем тверже стекло, тем больше времени необходимо затратить на эти процессы. С другой стороны, менее твердое стекло легче царапается, и, следовательно, получение полированной поверхности высокого класса чистоты затруднено.

В зависимости от твердости стекла выбирают вид и зернистость шлифующего абразива, материал рабочей поверхности полировальника, полирующий абразив и жидкую фазу суспензии этого абразива.

При шлифовании стекла учитывают его относительную **твердость  $K_T$  по сошлифовыванию**. Характеристикой этой величины является отношение объема  $V^{K8}$ , толщины  $h^{K8}$  или массы  $m^{K8}$  сошлифованного стекла марки К8 к объему  $V^X$ , толщины  $h^X$  или массы  $m^X$ , стекла марки «х», сошлифованного при тех же условиях, то есть:

$$K_T = \frac{V^{K8}}{V^X} = \frac{h^{K8}}{h^X} = \frac{m^{K8}}{m^X}. \quad (1.4)$$

За единицу ( $K_T = 1,0$ ) принята относительная твердость стекла марки К8. Как и прочие свойства, твердость связана с химическим составом. Такие компоненты как  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $B_2O_3$  повышают твердость, а окислы одно- и двухвалентных элементов, особенно  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $PbO$  ее снижают.

Технология изготовления и эксплуатационные свойства оптических деталей зависят от **химической устойчивости стекла**. Она характеризует способность полированной поверхности противостоять разрушающему воздействию агрессивных сред.

Химическую устойчивость характеризуют двумя показателями:

1. Устойчивостью по отношению к средам (кислота, дистиллированная вода), с которыми полированные поверхности соприкасаются в процессе изготовления деталей и при сборке прибора.

2. Устойчивостью по отношению к влажной атмосфере, воздействию которой полированные поверхности деталей подвергаются при эксплуатации и хранении приборов.

Стекла, разрушаемые кислотой и дистиллированной водой называют *пятнающимися*, а разрушаемые влажной атмосферой – *налетоопасными*. Механизм разрушения представляет собой в обоих случаях процесс гидролиза легкорастворимых окислов поверхностного слоя.

Степень разрушения стекла кислотой и водой определяется растворимостью веществ, входящих в его состав и их способностью к ионному обмену с растворителем. Кислота и вода вымывают из поверхностного слоя

стекла растворимые продукты гидролиза – окислы тяжелых металлов, щелочи. На поверхности остается тонкая, пронизанная порами пленка коллоидного кремнезема, которая нерастворима в воде, устойчива к действию кислот и щелочей. Показатель преломления пленки меньше, чем у стекла и поэтому отраженный свет вследствие интерференции приобретает цветовую окраску. Попадая на отдельные участки полированной поверхности, кислота и вода образуют пятна. К наиболее сильно пятнающимся относятся стекла типов ТК, ТФ, БФ, которые содержат тяжелые металлы (PbO, BaO), определяющие величину показателя преломления. У стекол, не содержащих окислы тяжелых металлов, поверхностный слой обедняется щелочами. Это не вызывает существенного изменения показателя преломления и появления интенсивной интерференционной окраски.

Пятнаемость стекла характеризуют временем, в течение которого под воздействием 0,1н. раствора  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и дистиллированной воды при температуре  $50^\circ\text{C}$  на свежеполированной поверхности образуется пленка оптической толщины 135 нм. В зависимости от этого времени оптическое бесцветное стекло разделено на группы: 4 (1-4) с реагентом 0,1н. раствора  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и 2 (5-6) группы с реагентом дистиллированная вода.

При продолжительном воздействии влажной атмосферы, на поверхности стекла образуются капли, затем концентрация щелочей в этих каплях возрастает, и на их месте остаются разрушенные участки. Налетоопасными являются стекла с большим содержанием щелочных окислов, которые обладают повышенной гигроскопичностью. Разрушение поверхности (помутнение, образование кристаллов) проявляется на стеклах типа ФК, ОК, СТК, ТБФ, ОФ3, ОФ4, ОФ5. Без защиты полированных поверхностей такие стекла можно использовать только для внешних деталей, допускающих удаление налета путем протирки. Для деталей, помещаемых внутри приборов, незащищенные налетоопасные стекла не применяют. Налет удаляют чисткой и переполіроваванням поверхности.

По устойчивости к влажной атмосфере силикатные (А - Г) и несиликатные (С, у, д, дд) стекла разделены на группы, принадлежность к которым определяется длительностью выдержки во влажной атмосфере, при которой появляется разрушение.

В оптических приборах рекомендуется применять стекла групп А, Б, с, у. Детали из стекол В, Г, д, дд следует применять после предварительной защиты поверхностей.

## 1.5 Спектральные характеристики стекол

Спектральная характеристика любого оптического стекла определяется числовыми значениями показателя поглощения  $\alpha_\lambda$  или оптической плотности  $D_\lambda$  для различных длин волн и спектральными кривыми коэффициента пропускания  $\tau_\lambda$ .

**Показатель поглощения**  $\alpha_\lambda$  стекла для света длиной волны  $\lambda$  определяется из выражения:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{-lg\tau_{\lambda}}{l}, \quad (1.5)$$

где  $\tau_{\lambda}$  – коэффициент пропускания стекла толщиной  $l$  (мм) для монохроматического света длиной волны  $\lambda$ .

**Оптическая плотность**  $D_{\lambda}$  массы стекла для монохроматического света длиной волны  $\lambda$  связана с показателем поглощения  $\alpha_{\lambda}$  и коэффициентом пропускания  $\tau_{\lambda}$  следующим образом:

$$D_{\lambda} = -lg(\tau_{\lambda}) = \alpha_{\lambda} \cdot l. \quad (1.6)$$

Для расчета оптической плотности светофильтров кроме поглощения света необходимо учитывать потери на отражение от поверхностей образца стекла и вводить соответствующую поправку.

**Коэффициент пропускания**  $\tau'_{\lambda}$  светофильтра толщиной  $l$  (мм) при перпендикулярном падении монохроматического света данной длины волны равен:

$$\tau'_{\lambda} = (1 - R)^2 \cdot \tau_{\lambda} = (1 - R)^2 \cdot 10^{-\alpha_{\lambda} \cdot l}, \quad (1.7)$$

где  $R$  – коэффициент отражения.

**Оптическая плотность**  $D'_{\lambda}$  светофильтра для данной длины волны равна:

$$D'_{\lambda} = -lg(\tau'_{\lambda}) = D_{\lambda} + D_{pm} = \alpha_{\lambda} \cdot l + D_{pm}, \quad (1.8)$$

где  $D_{pm}$  – поправка на многократное отражения спектра излучения от поверхностей образца.

**Показатель преломления  $n$ , коэффициент отражения  $R$  и поправка на отражение  $D_{pm}$ .** Коэффициент отражения для расчета поправки на многократное отражение  $D_{pm}$  определяется по формуле Френеля:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2}, \quad (1.9)$$

где  $n$  – показатель преломления стекла.

Поправка на отражение определяется из выражения:

$$D_{pm} = -2 lg(1 - R). \quad (1.10)$$

Для видимой области спектра поправка на многократное отражение спектра излучения от поверхностей образца при измерении на спектрофотометре рассчитывается по формуле:

$$D_{pm} = -lg \frac{2n_e}{(n_e^2 + 1)}. \quad (1.11)$$

Для ультрафиолетовой и инфракрасной областей спектра  $D_{pm}$  следует рассчитывать, используя  $n$  для соответствующих длин волн.

Величины  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\text{пр}}$  характеризуют стекла длиной волны, соответствующей максимуму пропускания в рабочей части спектра и границей прозрачности (границей пропускания). За границу пропускания условно принята длина волны, для которой коэффициент пропускания в два раза меньше максимального его значения для данного стекла или, что одно и то же, для которой оптическая плотность на 0.3 больше, чем наименьшее ее значение. Величиной  $\lambda_{\text{пр}}$  обычно характеризуются стекла, имеющие резкую границу пропускания в коротковолновой области спектра (стекла марок ЖС, ОС, КС и ИКС).



## 1.6 Пример

Определить зависимость энергетического коэффициента пропускания оптического клина, изготовленного из бесцветного оптического стекла от координаты поверхности клина. Монохроматическое излучение (длина волны  $\lambda$ ) падает параллельным пучком по нормали на гипотенузную грань клина (рис. 1.2). Величина угла клина  $\theta$ , клин изготовлен из стекла известной марки, размер катетной грани  $a$ . Ось  $X$  совпадает с гипотенузой клина.

**Дано:**

Стекло марки ТК8

$a = 7$  см;  $b = 3$  см

$\theta = 3^\circ$ ;  $\lambda = 400$  нм

**Найти:**  $\tau_\lambda(x)$  - ?

**Решение:**

1. Решение задачи начинается с определения значения показателя преломления и показателя ослабления стекла, из которого изготовлен клин, для данной длины волны по каталогу оптического бесцветного стекла:  $n_e = 1,63313$

$\mu_\lambda = 0,0192$  (на 1 см) – показатель ослабления

2. Определяем границы падения излучения на клин, в которых луч проходит без полного внутреннего отражения (ПВО) (рис. 1.2 б) и с ПВО (рис. 1.2 в).

3. Затем следует найти длину пути луча в клине при падении излучения в точку  $C$  с координатой  $x$  и определить координату на катетной грани выхода падающего луча для случая, где отсутствует ПВО.

4. Рассмотрим схему 1, рис б.:

$$\text{В } \triangle ABC: \cos\theta = \frac{a}{X}; X = \frac{a}{\cos\theta}, \text{ В } \triangle ADE: \operatorname{tg}\theta = \frac{l_1}{x_1}; l_1 = \operatorname{tg}\theta \cdot x_1$$

$$\text{В } \triangle ADF: \sin\theta = \frac{d}{x_1}; d = \sin\theta \cdot x_1; \cos\theta = \frac{d+b}{l};$$

$$l = \frac{d+b}{\cos\theta} = \frac{\sin\theta \cdot x_1 + b}{\cos\theta} = \operatorname{tg}\theta \cdot x_1 + \frac{b}{\cos\theta} \text{ при } x, \text{ не превышающем:}$$

$$1) \triangle ADF: \cos\theta = \frac{a_1}{x_1}, a_1 = \cos\theta \cdot x_1; \operatorname{tg}\theta = \frac{a_2}{d+b} = \frac{a_2}{\sin\theta \cdot x_1 + b};$$

$$a_2 = \operatorname{tg}\theta(\sin\theta \cdot x_1 + b); a = \cos\theta \cdot x_1 + \operatorname{tg}\theta \cdot \sin\theta \cdot x_1 + \operatorname{tg}\theta \cdot b$$

$$2) \triangle ADE: \cos\theta = \frac{x_1}{a_{12}}; \operatorname{tg}\theta = \frac{a_{22}}{b}; a_{12} + a_{22} = \frac{x}{\cos\theta} + \operatorname{tg}\theta \cdot b \rightarrow$$

$$x_1 = a \cdot \cos\theta - \operatorname{tg}\theta \cdot b \cdot \cos\theta \rightarrow x \in [0 \dots a \cdot \cos\theta - \operatorname{tg}\theta \cdot b \cdot \cos\theta]$$

5. Рассмотрим схему 2, рис. в.:

$$\text{В } \triangle ABC: \operatorname{tg}\theta = \frac{X-x_1}{l_1}, l_1 = \frac{X-x_1}{\operatorname{tg}\theta}$$

$$\text{В } \triangle CDE: \cos\theta = \frac{c_2}{l_2}; c_2 = c - c_1.$$

$$\text{В } \triangle BCF: \operatorname{tg}\theta = \frac{BC}{CF}, \operatorname{tg}\theta = \frac{BC}{a} \rightarrow BC = \operatorname{tg}\theta \cdot a, c = BC + b = \operatorname{tg}\theta \cdot a + b$$

$$c_1 = \frac{X-x_1}{\sin\theta}; c_2 = \operatorname{tg}\theta \cdot a + b - \frac{X-x_1}{\sin\theta}; l_2 = \frac{c_2}{\cos\theta} = \frac{\operatorname{tg}\theta \cdot a}{\cos\theta} + \frac{b}{\cos\theta} - \frac{X-x_1}{\sin\theta \cos\theta};$$

$$l = \frac{tg\theta \cdot a + b}{\cos\theta} + \frac{x-x_1}{tg\theta} - \frac{x-x_1}{\sin\theta \cos\theta} = \left( \frac{tg\theta \cdot a + b}{\cos\theta} + \frac{a}{\sin\theta} - \frac{a}{\sin\theta \cos^2\theta} \right) + x_1 \left( \frac{1}{\sin\theta \cos\theta} - \frac{1}{tg\theta} \right);$$

$$l = a \left( \frac{tg\theta}{\cos\theta} + \frac{1}{\sin\theta} - \frac{1}{\sin\theta \cos^2\theta} \right) + \frac{b}{\cos\theta} + x_1 \left( \frac{1}{\sin\theta \cos\theta} - \frac{1}{tg\theta} \right);$$

Таким образом,  $x \in \left[ a \cdot \cos\theta - tg\theta \cdot \cos\theta \cdot b \dots \frac{a}{\cos\theta} \right]$ .

6. Определим френелевский энергетический коэффициент отражения:

$$R = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} = \frac{(1.63313-1)^2}{(1.63313+1)^2} = \frac{0.4008}{6.9333} = 0.0578.$$

7. Пропускание  $\tau(x)$  будет иметь зависимость от  $x$  такого вида:

$$\begin{aligned} \tau(x) &= (1 - R)^2 \cdot 10^{-\mu_\alpha \cdot tg(\theta) \cdot x} = (1 - 0.0578)^2 \cdot 10^{-0.0192 \cdot tg(3^\circ) \cdot x} = \\ &= 0.8877 \cdot 10^{-0.00273x} \end{aligned}$$

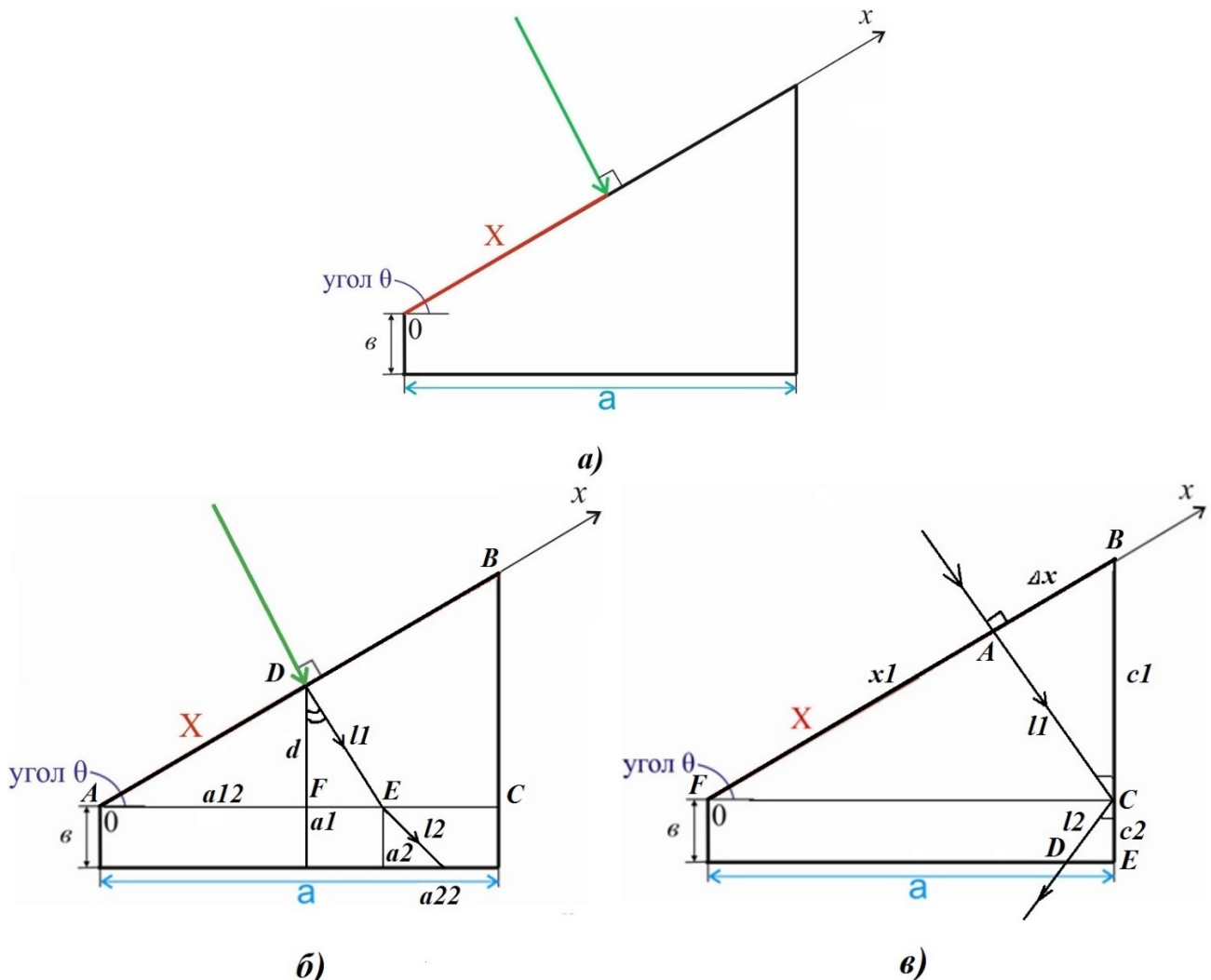


Рисунок 1.2 - Схема 1.а – чертеж задания, б – ход луча в клине (без ПВО), в – ход луча в клине (с ПВО)

8. Определим границы ПВО:

В случае, когда луч проходит через клин без ПВО, координата точки на катете клина будет находиться в пределах:  $x \in [0 \dots a \cdot \cos\theta - \operatorname{tg}\theta \cdot b \cdot \cos\theta]$ , то есть  $x \in [0 \dots 6.833]$ .

Когда происходит ПВО при прохождении луча через клин, то координата точки на катете клина будет находиться в пределах:  $x \in \left[ a \cdot \cos\theta - \operatorname{tg}\theta \cdot b \cdot \cos\theta \dots \frac{a}{\cos\theta} \right]$ , то есть  $x \in [6.833 \dots 7.010]$ .

9. Построим графики зависимости  $\tau(x)$  в случае без ПВО и с ПВО (рис. 1.3):

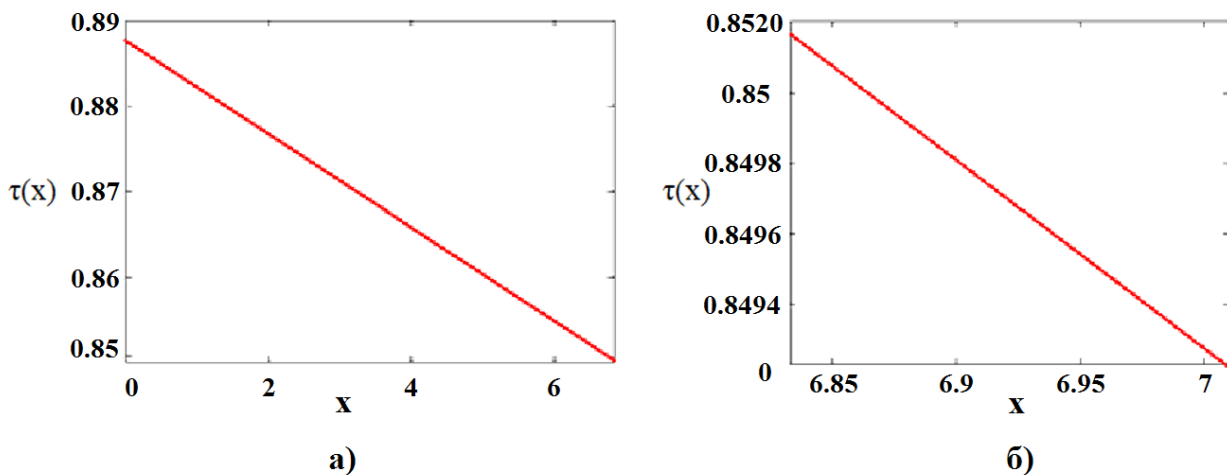


Рисунок 1.3 - Графики зависимости  $\tau(x)$  в случае без ПВО (а) и с ПВО (б)

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2.

### Расчет свето-технических характеристик плоскопараллельной пластины, выполненной из цветного стекла

#### 2.1 Цветное стекло

Если вещество способно поглощать часть видимого света, а остальную пропускать, то оно окрашено в цвет того излучения, которое пропускает. Например, стекло, окрашенное в красный цвет, поглощает излучение фиолетового, синего, желтого и зеленого цвета и пропускает излучение красного цвета.

Кислородные стекла приобретают способность поглощать видимую область спектра при наличии в них центров окрашивания – молекулярных или коллоидных. Для варки цветного оптического стекла используют силикатную, фосфатную и другие основы бесцветного стекла. Красители, вводимые в шихту, могут находиться в стекле в молекулярно растворенном или коллоидном состоянии. Молекулярные красители – это окислы металлов, в частности: Со, Си, Сг и др, коллоидные – Se, Cd, Au, Ag. Коллоидные красители окрашивают стекло от желтого до темнокрасного цвета. Красители влияют на спектральные характеристики стекол, а их физико-химические свойства определяются основным составом. Цвет и интенсивность окраски стекол зависят от природы и концентрации красителя, режима варки.

В зависимости от окраски цветные оптические стекла разделяются на ряд типов. Каждый тип включает несколько марок, различающихся интенсивностью окраски. Обозначения марок составлено из букв и цифр. Первая или две первые буквы – начальные буквы наименования цвета, а последняя (одинакова для всех видов) буква С – начальная буква слова «стекло». Цифра в марке показывает порядок разработки. Чем меньше номер, тем раньше это стекло освоено промышленностью. Примеры из ГОСТ 9411-91: УФС – ультрафиолетовые, ОС – оранжевые, СЗС – синезеленые, НС – нейтральные.

Область применения цветного стекла той или иной марки определяется его спектральными свойствами, для характеристики которых используют:

- 1) Численные значения показателей поглощения  $\alpha_\lambda$  или оптической плотности  $D_\lambda$  для разных длин волн,
- 2) Спектральные кривые коэффициента пропускания  $\tau_\lambda$ , оптической плотности  $D_\lambda$  и логарифма оптической плотности -  $\lg D_\lambda$ .

Стекла, окрашенные молекулярными красителями, имеют избирательную кривую пропускания ил срезают некоторые области спектра (например, стекла СС1 или СЗС7). А стекла, окрашенные коллоидными красителями, дают резкую границу пропускания (ЖС10, КС19), срезая целые области спектра.

#### 2.2 Характеристики светофильтров

Светофильтрами называются устройства, меняющие спектральный состав или энергию падающей на них световой волны, не меняя (или почти не меняя) формы ее фронта.

Основная характеристика светофильтра – пропускание  $T = \frac{I}{I_0}$ , где  $I$  и  $I_0$  – интенсивности прошедшего и падающего на него света.

Важными характеристиками светофильтра являются (см. рис 2.1):

- величина максимального пропускания  $T_{max}$ ;
- длина волны максимума пропускания  $\lambda_{max}$ ;
- ширина полосы пропускания  $\delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ , где  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  – длины волн, на которых пропускание уменьшается в два раза  $T = T_{max}/2$ ;
- фактор контраста, который дает отношение максимального и минимального пропусканий.

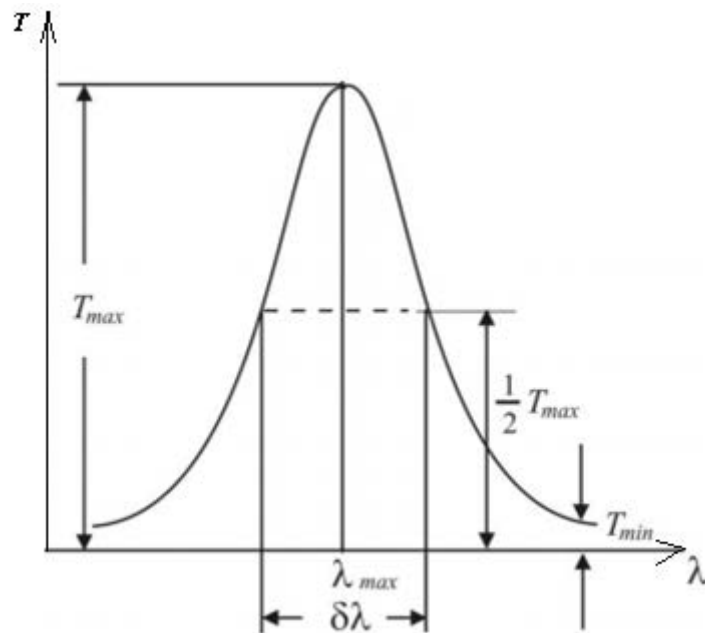


Рисунок 2.1 - Спектр пропускания интерференционного светофильтра

### 2.3 Виды светофильтров

Фильтры называются *серыми*, или *нейтральными*, если их пропускание в исследуемом спектральном интервале не зависит от длины волны. Светофильтры, не удовлетворяющие этому условию, называются *селективными*.

Селективные фильтры предназначаются либо для выделения широкой области спектра (полуширина в этом случае больше величины  $0,1\lambda_{max}$ ), либо для выделения узкой спектральной области. Светофильтры последнего типа называются *узкополосными*.

По принципу действия СФ разделяются на следующие виды:

- **абсорбционные** (выделяют пучок излучения, поглощая определенную часть спектра),
- **отражательные** (действие основано на спектральной зависимости отражения непрозрачного материала),

- **интерференционные** (отражают одну и пропускают другую часть спектра падающего излучения, благодаря явлению многолучевой интерференции),

- **дисперсионные** (работа фильтра осуществляется за счет зависимости показателя преломления от длины волны),

- **поляризационные** (пропускает свет, поляризованный в определенной плоскости или в круге).

## 2.4 Пример

Определить коэффициент пропускания системы, состоящей из двух светофильтров, изготовленных из различных марок цветных стёкол и склеенных между собой. Монохроматический свет падает перпендикулярно поверхности системы.

**Дано:**

Стекла марки:

ЖС19,  $l = 5$  мм

НС6,  $l = 1$  мм

$\lambda = 600$  нм

**Найти:**  $\tau'_\lambda$  - ?

**Решение:**

Из каталога цветных стекол определяем спектральный показатель поглощения и показатель преломления для каждого стекла:

$$\alpha_\lambda(\text{ЖС19}) = 0,019 \quad n_D = 1,515$$

$$\alpha_\lambda(\text{НС6}) = 0,055 \quad n_D = 1,498$$

### I-й вариант

1. Определяем поправку на многократное отражение

$$D_{pm} = -lg\left(\frac{2n}{n^2 + 1}\right)$$

$$D_{pm}(\text{ЖС19}) = -lg\frac{2 \cdot 1,515}{1,515^2 + 1} = -lg\frac{3,03}{3,295} = 0,0364$$

$$D_{pm}(\text{НС6}) = -lg\frac{2 \cdot 1,498}{1,498^2 + 1} = -lg\frac{2,996}{3,244} = 0,0345$$

2. Определяем оптическую плотность:

$$D_\lambda = -lg(\tau_\lambda) = \alpha_\lambda \cdot l$$

$$D_\lambda(\text{ЖС19}) = 0,019 \cdot 5 = 0,095$$

$$D_\lambda(\text{НС6}) = 0,055 \cdot 1 = 0,055$$

3. Оптическая плотность светофильтра после прохождения через него света будет равна сумме оптической плотности и поправки на многократное отражение:  $D'_\lambda = D_\lambda + D_{pm}$

$$D'_\lambda(\text{ЖС19}) = 0,095 + 0,0364 = 0,1314$$

$$D'_\lambda(\text{НС6}) = 0,055 + 0,0345 = 0,0895$$

4. Рассчитываем пропускание светофильтра:

$$\tau'_\lambda = 10^{-D'_\lambda}$$

$$\tau'_\lambda = 10^{-0,1314} = 0,739$$

$$\tau'_\lambda = 10^{-0,0895} = 0,814$$

5. Общий коэффициент пропускания двух светофильтров равен произведению пропусканий светофильтров:

$$\tau'_{\text{общ}} = 0,739 \cdot 0,814 = 0,601 = 60,1\%$$

## II-й вариант

1. Определяем френелевский коэффициент отражения:

$$R = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

$$R(\text{ЖС19}) = \frac{0,265}{6,325} = 0,042$$

$$R(\text{НС6}) = \frac{0,248}{6,24} = 0,0397$$

2. Определяем коэффициент пропускания каждого светофильтра

$$\tau_\lambda = 10^{-\alpha_\lambda \cdot l}$$

$$\tau_\lambda(\text{ЖС19}) = 10^{-0,019 \cdot 5} = 0,804$$

$$\tau_\lambda(\text{НС6}) = 10^{-0,055 \cdot 1} = 0,881$$

3. Определяем коэффициент пропускания светофильтра после прохождения через него света:

$$\tau'_\lambda = (1 - R)^2 \cdot \tau_\lambda$$

$$\tau'_\lambda(\text{ЖС19}) = (1 - 0,042)^2 \cdot 0,804 = 0,738;$$

$$\tau'_\lambda(\text{НС6}) = (1 - 0,0397)^2 \cdot 0,881 = 0,812;$$

4. Общий коэффициент пропускания двух светофильтров равен произведению пропусканий светофильтров:

$$\tau'_{\text{общ}} = 0,738 \cdot 0,812 = 0,600 = 60,0 \%$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №3. Определение коэффициента фотохромности

### 3.1 Фотохромные стекла

Отличительное свойство фотохромных стекол – пропорциональное уменьшение их энергетического коэффициента светопропускания по мере увеличения интенсивности падающего светового потока. Подобные стекла могут быть получены двумя путями: введением в инертную матрицу фотохромных веществ ( $\text{AgCl}$ ,  $\text{CuCl}$ ) или введением в фотохромную матрицу сенсibilизаторов, повышающих фотохромный эффект ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{MnO}_2$  и др.). Стекло приобретает свойство фотохромизма после его термообработки в процессе которой развивается микроливация, то есть разделение на отдельные фазы. При этом в стекле образуется большое количество неоднородностей ( $10^{15}$  в  $1^3$  см) в форме капель размером 50-300 нм. Фотохромное вещество, в частности галоидное серебро, вытесняется в поверхностные слои капель.

Под действием светового излучения происходит разложение микрокристаллов галоидного серебра. Вокруг стеклянного ядра образуется серебряная оболочка. Частицы металлического серебра, являясь красящими центрами, снижают светопропускание стекла. Но так как галоген не может переместиться в стекле на большое расстояние, он остается достаточно близко от кристаллика серебра и после прекращения действия световых фотонов рекомбинирует с серебром. Прежнее пропускание света восстанавливается. Таким образом, физическая основа процесса протекающего в фотохромных стеклах та же, что и в фотоэмульсиях, а именно разложение фотохромного вещества под действием света. Принципиальное отличие заключается в том, что в стеклах этот процесс обратим, в то время как фотоэмульсию можно засветить только один раз.

Оптические свойства фотохромных стекол характеризуются коэффициентом фотохромности –  $K_f$  и коэффициентом чувствительности  $S_f$ .

Коэффициент  $K_f$ , показывает уменьшение добавочной оптической плотности фотохромного стекла за 30" обесцвечивания:

$$K_f = \frac{D_{\text{обл}} - D_{\text{обесцв}}}{D_{\text{обл}} - D_0}, \quad (3.1)$$

$D_{\text{обл}}$  – оптическая плотность пластинки после 30" непрерывного облучения источником имитирующим солнечное излучение,  $D_{\text{обесцв}}$  – оптическая плотность той же пластинки, обесцвеченной в течение 30" после окончания облучения при  $20^\circ\text{C}$  и освещенности не более 10 люкс,  $D_0$  – оптическая плотность в видимой области спектра пластинки толщиной 2.5 мм.

Коэффициент  $S_f$  – величина обратная количеству освещения, необходимого для получения добавочной оптической плотности равной 0.2 при заданных условиях освещения:

$$S_f = \frac{I}{E \cdot t} \text{ люкс}^{-1} \text{сек}^{-1}. \quad (3.2)$$

$E$  – экспозиция, необходимая для получения добавочной оптической плотности, равной 0.2;  $t$  – продолжительность экспозиции, сек.



В настоящее время выпускают несколько марок фотохромных стекол: ФХС2, ФХС3, ФХС6, ФХС7, ФХС8.

Стекло марки ФХС2 предназначено для записи информации и фиксации трехмерных голограмм. Из стекла марки ФХС3 изготавливают линзы солнцезащитных очков, которые можно использовать как на открытой местности, так и внутри застекленных помещений. Стекло создает условия комфортного зрения при изменении освещенности от 5 до 50 тысяч лк. Из стекла марки ФХС6 изготавливают линзы солнцезащитных очков для работы только на открытой местности. Преимуществом ФХС6 перед ФХС3 является то, что в исходном необлученном состоянии оно имеет более высокую прозрачность и не окрашено. Стекло марки ФХС8 применяется при остеклении зданий или транспорта, поэтому фотохромные свойства в нем достигаются за счет применения недефицитных галоидных соединений меди, а не серебра.

Если необходимо подобрать марку фотохромного стекла, то ориентируются на значение исходной оптической плотности и плотности после 30-секундного воздействия солнечного света или облучения на установке ИФС-2. Для марки ФХС2 значения плотности составляют 0.1 и 1.0, для ФХС3 – 0.1 и 0.5, для ФХС6 – 0.04 и 0.5, для ФХС7 – 0.15 и 1.3, для ФХС8 – 0.15 и 0.4 соответственно. При взаимодействии активирующего излучения с возникающими центрами окраски интенсивность активации быстро падает, поэтому нецелесообразно использовать фотохромные стекла толщиной более 3-5 мм.

С недавнего времени в оптическом приборостроении, особенно в лазерной технике, некоторые задачи решаются путем использования эффекта Фарадея – вращения плоскости поляризации светового луча в магнитном поле. Угол поворота  $\varphi$  определяется соотношением:

$$\varphi = VSH, \quad (3.3)$$

где  $V$  – постоянная Верде, мин/(см·А/м);  $H$  – напряженность поля, А/м;  $S$  – толщина стекла, см. Постоянная Верде обратно пропорциональна квадрату длины волны света, в связи с чем она быстро убывает в ближней ИК-части спектра.

Обычные стекла из каталога имеют малое вращение плоскости поляризации (максимальное значение постоянной Верде равно 0.07 для стекла марки ТФ7). Введение в стекло парамагнитных редкоземельных ионов позволяет резко повысить эту способность.

Широко используется стекло марки МОС13 из оксидов кремния, бора, цинка, бария и триоксида тербия. Постоянная Верде равна 1.2 для длины волны 420 нм, показатель преломления 1.57, интегральное светополощение – 0.5% на 1 см толщины.

Для видимой и ближней ИК-областей спектра разработаны новые марки стекол – МОС04 и МОС10. Для работ в области 300-420 нм разработано стекло марки МОС07 на основе оксида празеодима.

### 3.2 Пример

Определить коэффициент фотохромности пластины, изготовленной из стекла марки ФХС2, толщиной 2.5 мм, если известно, что оптическая плотность этой пластинки после обесцвечивания в течение 30 секунд после окончания облучения равна 0.77.

**Дано:**

Стекло марки ФХС2

$l = 2.5$  мм

$D_{\text{обесцв}} = 0.77$

**Найти:** КФ-?

**Решение:**

1. Из каталога «Цветное оптическое стекло и особые стекла» находим для марки стекла ФХС2 оптическую плотность в видимом диапазоне спектра и оптическую плотность после 30 секундного облучения солнечным излучением:

$$D_0 = 0.07 \text{ и } D_{\text{обл}} = 1.0$$

2. Затем по формуле определяем коэффициент фотохромности:

$$K_{\text{ф}} = \frac{D_{\text{обл}} - D_{\text{обесцв}}}{D_{\text{обл}} - D_0},$$
$$K_{\text{ф}} = \frac{1.0 - 0.77}{1.0 - 0.07} = \frac{0.23}{0.93} = 0.247.$$

**Ответ:**  $K_{\text{ф}} = 0.247$

## **ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №4.**

### **Оформление чертежа на оптический элемент**

Все оптические элементы можно разделить на четыре вида: пластинки, клинья круглой и некруглой формы, линзы и призмы и др.

Чертежи оптических деталей имеют некоторые особенности, отличающие их от чертежей деталей из других конструкционных материалов, а именно: помимо необходимых размеров, проставляемых на проекциях изображения детали, в поле чертежа помещают таблицу, которая состоит из трех частей. В первой указывают требования к материалу, во второй – требования к точности изготовления и в третьей – контролируемые выходные параметры.

#### **4.1 Требования к материалу**

В первой части таблицы при изготовлении деталей из бесцветного оптического стекла по ГОСТ 3514-94 приводят нормируемые показатели качества стекла: категорию и класс стекла по показателю преломления  $n_e$  и средней дисперсии  $n'_F - n'_C$ , категорию оптической однородности и двойного лучепреломления, категории и класс стекла по свильности и пузырьности, категорию показателя ослабления.

Требования к нормируемым показателям качества стекла назначают исходя из технических условий на оптические характеристики системы (качество изображения, разрешающая способность, ЧКХ и др.), служебного назначения каждой из составляющих ее деталей и условий их работы.

Известно, что для деталей находящихся в широком сечении пучка лучей (сетки, линзы окуляров и т.п.) требования по этим показателям снижают. По пузырьности наоборот, чем меньше сечение падающего пучка излучения, тем требования выше.

Некоторые параметры оптического стекла влияют не только на оптические характеристики детали, но и на точность формообразования. Например, свили вызывают деформацию волнового фронта, также и ошибки формы поверхности в тех участках, где они выходят наружу. Остаточные напряжения, характеризуемые двойным лучепреломлением, так же как и свили деформируют волновой фронт. В то же время их перераспределение при изменении толщины заготовки в процессе обработки приводит к деформации поверхностей. Пузырность стекла является не только дефектом чистоты поля зрения, но и причиной местных ошибок полированной поверхности, которые образуются вокруг вскрытых пузырей. Эти ошибки ухудшают оптические характеристики детали.

#### **4.2 Требования к точности изготовления**

Из-за производственных погрешностей, линейные размеры деталей, форма и взаимное расположение их поверхностей отклоняются от установленных расчетами или выбранных из конструктивных соображений. Величину отклонений ограничивают допусками, которые подразделяют на две

группы. Одна из них определяет оптические свойства деталей, другая – характер их соединения с оправами.

Параметры, определяющие оптические свойства деталей относятся:

- радиусы сферических или параметры асферических поверхностей,
- форма и взаимное расположение поверхностей,
- толщина по оси и световые диаметры,
- чистота полированных поверхностей.

Допуски на эти параметры назначают по данным оплотехнического расчета. Если системы близки по типу и назначению, то детали могут быть изготовлены примерно с равной точностью. Это позволяет при разработке новых систем устанавливать допуски на некоторые детали по аналогии с известными.

Допуски на параметры, определяющие характер соединения деталей с оправами или другими устройствами, фиксирующими их положение в приборе, устанавливают в соответствии с выбранной посадкой. В оптическом производстве применяют посадки с зазором, которые обеспечивают возможность перемещения одной детали относительно другой. Посадки с натягом недопустимы.

#### ***4.2.1 Допуски на отклонения радиусов сферических поверхностей***

Чаще всего, форму полированных сферических и плоских поверхностей контролируют интерференционным способом. Этот способ предусматривает сравнение радиуса поверхности детали с эталоном, радиус поверхности которого соответствует заданному чертежом. Если эти радиусы не равны друг другу, то в воздушном зазоре между поверхностями будут видны интерференционные кольца или полосы, располагающиеся там, где толщина воздушного промежутка не постоянна. При переходе от одного кольца к другому, толщина промежутка меняется на  $\lambda/2$ . При наблюдении в белом свете это примерно 0,25 мкм. Число колец любого (но одного) цвета характеризует разность стрелок прогиба поверхности детали и эталона. Несоответствие между расчетным и фактическим радиусом поверхности, выраженное числом интерференционных колец называют общей ошибкой, обозначая в чертежах знаком  $N$ . Отступление колец от правильной (регулярной) формы показывает, что поверхность имеет местные или зональные ошибки. На чертежах их обозначают знаком  $\Delta N$ , а величину выражают в долях или целых числах интерференционных колец.

Погрешность в величине радиуса ( $N$ ) изменяет оптическую силу детали и смещает плоскость изображения. Отступление от регулярной формы ( $\Delta N$ ) вызывает деформацию волнового фронта и ухудшает качество изображения. Иногда на общие ошибки ставят большие допуски (десятки колец). Это практически не сказывается на абберациях и приводит лишь к некоторым изменениям фокусных отрезков  $f$  и  $f'$ , которые могут быть компенсированы при сборке. Однако, если общая ошибка велика, то бывает трудно различить

местные (зональные). Поэтому обычно общие ошибки превышают местные не более чем в 5-10 раз, то есть  $N \leq (5-10) \Delta N$ .

Поверхности, которые работают под углом к оси пучка (отражающие грани призм) в силу своего положения вызывают астигматизмы. Для таких поверхностей допуски на общие ошибки могут превышать местные не более чем в два раза, то есть  $N \leq 2 \Delta N$ . Допуски  $N$  и  $\Delta N$  на отражающие поверхности уменьшают в 3-5 раз по сравнению с  $N$  и  $\Delta N$  для преломляющих поверхностей.

### ***Пробные стекла***

Такие стекла относятся к особому виду гладких калибров – мер, предназначенных для проверки сферических и плоских поверхностей оптических деталей интерференционным методом (ГОСТ 2786-82).

Пробные стекла делятся на 3 типа: основные (ОПС) – для хранения единиц измерения и передачи их вторичным мерам – контрольным пробным стеклам (КПС), используемым для проверки рабочих мер – рабочих пробных стекол (РПС), предназначенных для контроля поверхностей изделий.

Конструктивные параметры выпуклых и вогнутых пробных стекол зависят от их типа, радиуса мерительной поверхности, диаметра контролируемой детали.

Диаметры ОПС находятся в пределах от 1 до 130 мм, а диаметры КПС и РПС изменяются в широких пределах и могут достигать 220 мм. Диаметр РПС должен быть равен 1,1 диаметра детали.

Пробные стекла диаметром до 180 мм изготавливают из стекла марок ЛК5 и ЛК7, а свыше 180 мм из ЛК5 или кварцевого стекла марок КВ, КУ-1 или КУ-2.

ОПС всех радиусов изготавливают парами, состоящими из выпуклого (+) и вогнутого (-) стекол, которые сопрягаются своими измерительными поверхностями с погрешностью  $N \leq 0,5$ .

КПС и РПС всех радиусов обычно изготавливают только одного знака: радиусы КПС соответствуют кривизне контролируемой детали, радиусы РПС имеют противоположный знак.

### ***4.2.2 Допуски на взаимное расположение поверхностей Пластины***

Для деталей, рабочие поверхности которых должны быть параллельны (зеркала, защитные стекла и окна, сетки, подложки для фильтров и т.п.), устанавливают допуск на клиновидность ( $\theta$ ), ограничение отклонения осевого луча ( $\delta$ ) и поперечный хроматизм ( $\Delta \delta_{F/C}$ ) изображения.

Допуск может быть установлен как из условия сохранения направления линии визирования, так и допустимой величины хроматизма, то есть соответственно:

$$\theta = \frac{\delta}{n_e - 1} \text{ или } \theta = \frac{\Delta \delta_{F/C}}{n_e - 1} v \frac{1}{\Gamma}, \quad (4.1)$$

где  $\delta$  – отклонение осевого луча,  $v$  – коэффициент дисперсии,  $n_e$  – показатель преломления,  $\Gamma$  – увеличение системы.

## **Линзы**

Децентрированная линза – линза, у которой геометрическая ось не совпадает с оптической. Ее можно рассматривать как правильную линзу с приставленным к ней сферическим клином. Действие его, как и у пластинки, вызывает отклонение осевого луча, поперечный хроматизм, а также кому и астигматизм изображения.

Величина децентрировки  $C$  характеризуется углом  $\alpha$  наклона децентрированной поверхности по отношению к оптической оси, то есть  $C = \alpha$  или в линейной мере  $C = \alpha R$  (мм), где  $R$  – радиус децентрированной поверхности. В чертежах оптических деталей допуск на децентрировку может быть задан и в угловой и в линейной мере.

Допуск  $C$  на децентрировку определяют для каждой линзы с учетом ее конструктивных параметров и назначения в системе. Исходя из допустимого хроматизма ( $\Delta\delta_{F'C'}$ ) за окуляром прибора размер  $C$  рассчитывается по формуле:

$$C = \Delta\delta_{F'C'} \cdot \frac{d'_p}{D_p} \cdot \nu \cdot f', \quad (4.2)$$

где  $d'_p$  и  $D_p$  – диаметр выходного зрачка оптической системы и диаметр рабочего пучка в месте расположения линзы, соответственно,  $\nu$  – коэффициент дисперсии,  $f'$  – фокусное расстояние.

## **Призмы**

Любая отражательная призма должна быть эквивалентна плоскопараллельной пластике. Если углы призмы имеют погрешность, она становится подобной клину, который дает дополнительное отклонение луча и вносит хроматизм. Допуски на углы рассчитывают исходя из допустимой хроматической разности. Величина допусков зависит от типа призмы и условий ее работы в оптической системе. В соответствии с ГОСТ 2.412-81 децентрировка, то есть смещение центра кривизны нормируемой поверхности от оси, определяемой базовыми поверхностями, задается на чертеже позиционным допуском.

### **4.2.3 Чистота полированных поверхностей**

Знак шероховатости, который проставляется на чертеже, недостаточен для полной характеристики качества полированной поверхности. Также указывают класс чистоты –  $P$ , который регламентирует допустимое количество и размер дефектов (царапины, точки и др.), ухудшающих оптические свойства прибора вследствие светорассеяния, появления бликов и т.п. Класс чистоты назначают на основании требований к оптической системе с учетом технологических возможностей, эстетических и экономических соображений.

Предусмотрено 3 класса чистоты полированных поверхностей деталей, находящихся в плоскости действительного изображения или в плоскости предметов оптической системы: 0-10, 0-20, 0-40, и 9 классов чистоты I-IXа для поверхностей деталей, находящихся вне этих плоскостей.

Требования к чистоте полированных поверхностей, на которые наносят покрытия, повышают на один класс по сравнению с поверхностями без

покрытий. Это объясняется тем, что после нанесения покрытий проявляются и становятся четко видимыми все дефекты.

Во многих случаях необходимо изменить оптические, химические и электрические свойства деталей. С этой целью на их отражающие и преломляющие поверхности наносят покрытия – тонкие пленки диэлектриков, металлов, полупроводников и других веществ. С помощью таких пленок можно увеличить или уменьшить отражение света, разделить падающий и световой поток в заданном соотношении на отраженный и проходящий, предохранить полированные поверхности от разрушения влагой атмосферы и т.д. Тип покрытия, его материал, способ нанесения и конструкцию указывают вне изображения детали – после таблицы.

#### **4.2.4 Расчетные параметры детали (нижняя часть таблицы)**

На чертежах в нижней части таблицы указывают:

- оптические характеристики линз: фокусное расстояние  $f'$ , передний  $S_F$  и задний  $S'_F$  фокусные отрезки; одну из них указывают при необходимости с предельными отклонениями.

- фокусное расстояние зеркал  $f'$ , имеющих криволинейные поверхности;

- геометрическую длину хода луча  $l$  в призмах; световой диаметр  $\emptyset$  для линз и пластин круглой формы по наибольшему сечению пучка, или отношение диаметров, если световые зоны не показаны на чертеже.

#### **4.3 Анализ чертежа оптической детали**

**Ориентация изображения в поле чертежа.** Изображение оптических деталей должны быть расположены в поле чертежа в рабочем положении по ходу луча, идущего слева направо. Число проекций должно быть минимальным, но достаточным для простановки всех размеров. В зависимости от конструктивных особенностей детали могут быть изображены в осевых разрезах и сечениях или без них. Без разрезов дают простые положительные линзы и призмы. В осевых разрезах выполняют более сложные осесимметричные детали: линзы с вогнутыми поверхностями, зеркала с криволинейными поверхностями. При необходимости показа профиля более мелкого элемента детали его выполняют в виде выноски или на ограниченном участке изображения детали и, как правило, в увеличенном масштабе.

##### **Форма оптических поверхностей.**

Форма поверхности указывается в зависимости от кривизны поверхности и типа детали. Численные значения радиусов  $R$  сферических поверхностей линз и зеркал проставляются в соответствии с нормальными рядами радиусов по ГОСТ 1807-75.

Для асферических поверхностей типа цилиндра или тороида перед знаком  $R$  дается ее наименование, например «Цилиндр R101,86». В остальных случаях асферические поверхности задаются уравнением, написанным над стрелкой – указателем к этой поверхности, а также координатами точек, сведенными в

таблицу и помещаемую в поле чертежа. На плоских поверхностях линз, пластин, клиньев и призм знаки  $R=\infty$  не указывают.

При необходимости на поверхностях или на выносных линиях к ним указывают параметры шероховатости или символы дополнительной обработки, например тип покрытия на рабочей или место окраски нерабочей (матовой) поверхности.

### ***Размеры и точность взаимного расположения оптических поверхностей.***

Все размеры (кроме  $C$ ,  $\theta$ ,  $\pi$ ,  $\delta_{45}^\circ$ , которые приводятся таблице) проставляют непосредственно на изображении детали. Ниже приведены рекомендации по выбору значений толщин линз различного типа и пластин.

1. Толщину линз  $d$  по оси для отрицательных линз выбирают в зависимости от их диаметра  $D$  и точности обработки в соответствии с ОСТ 3-490-83. В качестве справочного размера у всех линз указывают толщину  $t$  по краю, а для менисков – и габаритную толщину  $d'$ .

2. Толщину пластин  $d$  в зависимости от их назначения и требуемой точности изготовления выбирают исходя из наибольшего размера  $l$  или диаметра пластины. Допуски на толщину плоскопараллельных пластин выбирают в соответствии для линз рядом в справочной литературе.

### ***Габаритные размеры деталей и точность взаимного расположения нерабочих поверхностей.***

1. Допуски и посадки на диаметры линз, сеток, светофильтров, зеркал и других круглых деталей выбирают в зависимости от точности центрирования детали и условий ее соединения с оправой, то есть с учетом того, является ли деталь центрирующей или нецентрирующей. В склеенной паре центрирующей линзой выбирается линза, имеющая большую толщину по краю. Такой линзе придают и больший диаметр, при этом центрирующей может быть как положительная, так и отрицательная линза.

2. Обозначения баз, взаимного расположения поверхностей деталей, точности их обработки предусмотрены ГОСТ 2.308-79.

3. Фаски защитные наносятся на острых краях линз для устранения выколов после центрирования, для предохранения от выкалывания и при креплении линз закаткой или кольцом. Ширину фасок выбирают в зависимости от диаметра линзы (ОСТ 3-1825-73). На чертеже линзы кроме ширины фаски  $m$  указывают угол ее наклона  $\alpha$ , выбираемый в зависимости от отношения  $D/R$ .

4. Размеры конструкторских фасок, предназначенных для уменьшения массы и обеспечения условий, удобного крепления в оправе, не нормируются.

### ***Дополнительный текст.***

Информация, отсутствующая в таблицах и на изображении детали, помещается в нижней части поля чертежа, за исключением параметров шероховатости, которые проставляются в правом верхнем углу поля чертежа.

### ***Шероховатость поверхностей.***

Параметры шероховатости поверхностей деталей зависят от свойств обрабатываемых материалов, методов их обработки (шлифования, полирования



и др.), характеристик инструмента и зернистости абразива. Для простановки на рабочем чертеже детали их выбирают по ГОСТ 2789-73 и ГОСТ 2.309-73. Одинаковые параметры шероховатости поверхностей указывают над таблицей требований к материалу и изготовлению. В более общем случае (поверхности имеют различные параметры шероховатости) над таблицей указывают параметр шероховатости, соответствующий большинству поверхностей данной детали. Остальные поверхности могут иметь различные параметры шероховатости. Наиболее часто применяют следующие параметры шероховатости:  $\sqrt[2.5]{8}$  - боковые (нерабочие) поверхности деталей;  $R_z^{0.05}\sqrt{0.8}$  - оптические отражающие и преломляющие (рабочие) поверхности.

#### ***Дополнительные требования к материалу.***

В ряде случаев перечень требований к материалу, регламентируемый стандартом, оказывается недостаточным. Например, для деталей ответственных фотообъективов допуски на оптические параметры могут оговариваться особо. Тогда в таблице против соответствующего обозначения параметра дается знак сноски, а в свободной части поля чертежа текстом – ссылка на соответствующий руководящий материал. Текстом, дополняющим таблицу, могут оговариваться и другие требования и другие требования (например, необходимость изготовления деталей из одного куска стекла или из стекла одной плавки и т.п.). Таким же образом могут оговариваться дополнительные требования или условия контроля некоторых показателей качества материала.

#### ***Дополнительные требования к изготовлению.***

В некоторых случаях (особенно это касается крупногабаритных деталей, независимо от вида материала) бывает необходимо приводить уточненные требования к изготовлению, например, более подробно охарактеризовать предельные значения отдельных видов местных отклонений поверхностей, указать предельные значения их соотношений, задать диаметр пробного стекла. При необходимости контроля поверхностей не эталоном, а по качеству изображения, по допустимому размеру кружка наименьшего рассеяния  $D_{кр}$  или по допустимому искажению волнового фронта в долях средней длины волны белого света  $\Delta b$  против символов N и  $\Delta N$  для соответствующих поверхностей даются знаки и сноски, а допуски – текстом в поле чертежа.

#### ***Справочные и дополнительные размеры и параметры.***

Текст в поле чертежа «Размер для справок» со знаком сноски указывает на то, что данный размер не подлежит контролю и может быть использован ориентировочно.

Специфические особенности конструкций некоторых деталей заставляют вносить в поле чертежа дополнительные параметры, простановка которых на чертеже детали затруднена, например, допуск на параллельность образующих поверхностей цилиндрической линзы.

#### ***Окраска нерабочих поверхностей.***

Нерабочие поверхности крупногабаритных деталей, а также кино- и фотооптики окрашивают, как правило, черными матовыми эмалями и лаками. Материал и места окраски задаются текстом в поле чертежа, а в более сложных

случаях дополнительно указывают штриховой линией на чертеже детали. Также текстом при необходимости указывают допустимость канта без покрытия и разнотолщинность слоя покрытия.

**Оптические покрытия.**

В зависимости от назначения детали на нее могут наноситься различные типы покрытий.

Выбор типов покрытий оптических деталей определяется функциональными требованиями, предъявляемыми к ним, условиями чистки деталей и эксплуатации прибора, их формой, производственными возможностями изготовителя.

Устанавливаются основные характеристики покрытий, определяющие оптические свойства, химическую, коррозионную и биологическую устойчивость, механическую и термическую прочность. По функциональному назначению покрытия оптических деталей подразделяют на типы.

Покрытия могут быть однослойными и многослойными. Исходные материалы, применяемые для образования отдельных слоев, способы их нанесения регламентируются соответствующими нормативными документами.

Условные обозначения покрытий на чертежах оптических деталей указываются на основании ГОСТ 2.412-91(см. таблицу 4.1).

Таблица 4.1 - Условные обозначения типов покрытий оптических поверхностей деталей

Тип покрытия	Условное графическое обозначение	Тип покрытия	Условное графическое обозначение
Зеркальное непрозрачное: внешнее		Защитное прозрачное	
Зеркальное непрозрачное: внутреннее		Электропроводящее	
Светоделительное		Поляризующее	
Просветляющее		Светопоглощающее	
Фильтрующее			

После условного графического знака типа покрытия указывается буква В или Х, определяющая способ нанесения покрытия (В- вакуумный, Х- химический). Затем ставится точка и номер покрытия. В случае нанесения

слоев разными способами указываются обе буквы через тире (В-Х). Для зеркальных и светоделительных покрытий после условного графического знака следует указать вид наносимых слоев: М – металлические, Д – диэлектрические, МД – металлодиэлектрические.

Если допускается модификация покрытия (число слоев, температурный режим, различные материалы отдельных слоев), то в обозначении покрытия добавляется знак «+».

#### ***Дополнительный текст.***

В свободном месте поля чертежа, как правило, под таблицей указывают дополнительные технологические требования: марку клеящего вещества по ГОСТ 14887-80 (или способ соединения); оптический контакт (с указанием нормативного документа); условное обозначение и шифр оптических покрытий; материал и ТУ покрытия, наносимого на нерабочие поверхности и фаски.

#### **4.4 Пояснения к выполнению чертежа и расчета оптической детали**

1. Чертеж может быть выполнен как от руки, так и в САПР, в соответствии с ГОСТ 2.109-73. Двояковыпуклая линза может быть нарисована в проекции, все остальные линзы рисуются в разрезе (со штриховкой).

Должны быть отмечены на чертеже:

- диаметр, радиус кривизны, толщина линзы (эти параметры необходимо рассчитать), а также соответствующие допуски;
- ширина и угол фаски;
- рабочие поверхности линзы, а также их шероховатости;
- покрытия;
- допуски на форму и расположение поверхностей.

Допуск на радиус кривизны не указывается на размерной линии, допуск на толщину задается в мм, для диаметра подбирается соответствующий квалитет по полю допуска  $h$  (в нашем случае  $h6-h9$ ). Таблицу соответствия допусков и квалитета для диапазонов номинальных значений можно найти в ГОСТе 25346-89, табл. 1.

Знаки  $R1$ ,  $R2$  считаются положительными, если радиус отложен вправо от линзы и отрицательными, если влево. Таким образом, получается, что у двояковыпуклой линзы первая поверхность по ходу луча (если источник света слева) положительная ( $R1 > 0$ ), а вторая – отрицательная ( $-R2 > 0$ ). Иными словами, радиус кривизны поверхности считается положительным, если ее центр кривизны находится справа от поверхности, и отрицательным, если он расположен слева от поверхности. На изображении детали знак не указывается.

Для положительных линз следует указать толщину линзы на крае и на оси, для отрицательной линзы достаточно указать осевую толщину линзы. Значение толщины на крае считается размером для справок, о чем следует указать в примечании, предварительно поставив за размером звездочку.

Под рисунком, в примечаниях указываются покрытия: значок, тип, и сокращенная формула. Если покрытия первой и второй поверхности линзы отличаются, то у значка ставят нижний индекс А или Б, соответственно.

В примечаниях могут также указываться параметры фасок (если они повторяются многократно), общий квалитет для всех размеров, показатель преломления стекла, способ склейки, методы обработки, допуски и обозначения, не указанные непосредственно на детали, ГОСТы, ОСТы, ТУ и др.

Рабочие поверхности линзы полируются, что соответствует наименьшей возможной шероховатости (0.025-0.1 мкм). Обозначение шероховатости нормируется ГОСТом 2.309-73.

Обозначение допусков показано в ГОСТ 2.412-81. В задании присутствуют несколько типов допусков: на форму, на расположение и на перпендикулярность. Все три могут задавать децентрировку линзы. В небольшой табличке, состоящей из трех ячеек, указывается тип допуска в виде значка (см. подробнее в ГОСТ 2.308-79). В том же ГОСТе показано, как обозначать базы. База – элемент детали, по отношению к которому задается допуск расположения или суммарный допуск формы и расположения рассматриваемого элемента. Некоторые допуски коррелируют с квалитетами. Узнать, какие, можно в ГОСТе 24643-81 (если есть выбор между степенями геометрической точности, выбирается самая неточная). Квалитет определяется по ГОСТу 25346-89.

На выпуклых поверхностях при отношении диаметра к радиусу кривизны поверхности больше 1.5 защитную фаску не выполняют; при отношении  $D/R$  от 1.3 до 1.5 фаска допускается, но не является обязательной. Если конструктивная фаска образует с сопрягаемой поверхностью линзы угол меньше  $110^\circ$ , то следует снимать дополнительно фаску от выколок.

Защитную фаску допускается графически не изображать. Размеры такой фаски следует указывать на полке линии-выноски, где  $m$  – ширина фаски. Если угол фаски не нормируется, то указывается только ширина. Если защитная фаска недопустима, то на чертеж наносится надпись «острая кромка». Ширина защитных фасок при креплении резьбовым кольцом выбирается в зависимости от диаметра линзы. Линза по умолчанию не склеиваемая, если не указано обратного в примечании задания.

2. Требования к материалу оформляются в верхней части таблицы (ГОСТ 2.412-81). Они формируются исходя из применения оптической детали: прибор, сходящийся или расходящийся, узкий или широкий пучок лучей. Если ширина пучка лучей мала по сравнению с диаметром линзы (например, в окуляре), то пучок считается узким и все категории кроме пузырности для такой линзы будут низкими. Пузырность - наоборот берется высокой категории, поскольку размер пузырей должен быть значительно меньше диаметра пучка, чтобы избежать сильного искажения изображения. Линзы объективов и оборачивающих систем работают в широких пучках, поэтому их материалы должны обладать высокими категориями по  $n_e$  и  $v_e$ , однородности, двулучепреломлению и бессвильности. Категории по пузырности берутся низкие. Тип объектива также имеет значение: микрообъективы высокого увеличения наиболее чувствительны к качеству материала, проекционные и

фотообъективы требуют качественного материала из-за высоких требований к качеству изображения.

В нашем расчете качество материала будет определяться исходя из применения и ограничиваться маркой стекла (ГОСТ 3514-94 табл. 2). Будем считать, что при обозначении категории оптических констант «1А-2А» означает 1А, 2А, а также и 1Б. Категорию на отклонение коэффициента дисперсии допускается брать равной категории по средней дисперсии. В результате, в таблице должны быть указаны 7 категорий и 4 класса.

3. Требования к изготовлению оптической детали.

#### **Определение общей ошибки (N)**

Для этого сначала обратимся к виду крепления линзы в оправе (он находится в исходных данных). Затем найдем разницу между световым и полным диаметром линзы. Выбор допуска на форму поверхности производится в зависимости от назначения детали или отношения  $D/D_n$ , где  $D$  - диаметр детали (линзы, зеркала и пр.),  $D_n$  - диаметр рабочего отверстия поверхности этой детали. Чем меньше отношение  $D/D_n$ , тем меньше допустимое число колец, то есть:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{D}{D_n}\right)^2; \quad (4.3)$$

где  $N_0 = 0.5 \dots 1$  (для отражающих поверхностей),  $N_0 = 2 \dots 3$  (для преломляющих поверхностей). В нашем случае полный диаметр линзы берется как  $D$ , а световой диаметр считаем как рабочее отверстие поверхности этой детали  $D_n$ . Все поверхности в нашем случае – преломляющие, то есть  $N_0 = 2$ .

Значение  $\Delta N$  выбирается на порядок меньше ( $N/10$ ).

**Класс точности** пробного стекла  $\Delta R$  выбирается исходя из применения линзы и параметров общей и местной ошибок. Для неотчетливых систем (конденсоры) можно указывать допуск на радиус пробных стекол в %. В справочной литературе конденсор приравнивается к микрообъективу до  $10^x$ , оборачивающая система = зеркало средней точности, проекционный объектив = аэросъемочный, окуляр = лупа, объектив теневого прибора = обычный объектив.

**Класс чистоты.** На поверхностях оптических деталей допускается некоторое количество дефектов. К дефектам чистоты поверхности относят царапины (отношение длины к ширине  $>3:1$ ), точки (отношение длины к ширине  $<3:1$ ), прошлифованные пузыри и выколки. В задании даны дефекты и их размеры. Если линза входит в склейку, то к склеиваемой поверхности налагаются дополнительные условия в зависимости от вида используемого клея.

4. Расчетные данные.

В третьей части таблицы должны быть указаны:

- заднее фокусное расстояние  $f'$ ;
- передний ( $S_f$ ) и задний ( $S_f'$ ) фокальные отрезки линзы.

Формула для расчета заднего фокусного расстояния через радиусы кривизны поверхностей также включает показатель преломления стекла линзы  $n_e$  и осевую толщину линзы  $d$ :

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n} \cdot \frac{d}{r_1 \cdot r_2}; \quad (4.4)$$

где  $r_1$ , мм – радиус кривизны первой по ходу луча поверхности (поверхности, на которую падает луч),  $r_2$ , мм – радиус кривизны второй поверхности,  $d$ , мм – толщина линзы по оптической оси,  $n$  – показатель преломления стекла на длине волны 546 нм (линия е).

Формула для расчета переднего фокусного отрезка:

$$S_f = -f' \cdot \left( 1 + \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_2} \right); \quad (4.5)$$

Формула для расчета заднего фокусного отрезка:

$$S_{f'} = f' \cdot \left( 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1} \right); \quad (4.6)$$

На чертеже линзы все радиусы кривизны обозначаются по модулю со знаком плюс, к примеру, R20,51.

Однако, при расчете фокального расстояния и отрезков радиусы кривизны берутся со знаками. Радиус кривизны поверхности, которая выпуклой частью смотрит направо, берется со знаком минус. Радиус кривизны поверхности, которая выпуклой частью смотрит налево, берется со знаком плюс. Таким образом, получается, что у двояковыпуклой линзы первая поверхность по ходу луча (если источник света слева) положительная ( $R1 > 0$ ), а вторая – отрицательная ( $-R2 > 0$ ).

В оптических чертежах ход луча всегда слева направо. Фокусное расстояние и отрезки, которые откладываются против хода луча, берутся со знаком минус, по ходу луча – со знаком плюс.

Показатель преломления стекла определяется по ГОСТ 3514-94.

Для определения толщины линзы по диаметру и допуску на местную ошибку  $\Delta N$  следует воспользоваться таблицами в справочной литературе (например, в справочнике оптика-технолога на стр. 76). Берется наименьшее значение, то есть то, что указано в таблице. Допуск на толщину линзы  $\Delta d$ , который обозначается на рисунке, можно получить исходя из значений диаметра линзы и применения. При этом  $\Delta d$  линз фотографических объективов и объективов микроскопов делится на 10, поскольку они являются ответственными деталями. Толщину линзы и допуск на нее следует указать на рисунке.

**Основные качества**, использующиеся при изготовлении оптических деталей, на полный диаметр линзы:

Высокая точность – качества 6-7 (технический уровень точности)

Средняя точность – качества 8-9 (производственный уровень точности)

Пониженная точность – качества 10-11 (экономический уровень точности)

Для остальных номинальных размеров точность устанавливается по выбранному качеству на диаметр линзы следующим образом:

Допуски (отклонения) для номинальных размеров (для остальных размеров линз, таких как толщина):

- До 500 мм диаметра линзы допуск рассчитывается как  $k \cdot i$ , где  $i = 0.45 \cdot \sqrt[3]{D} + 0.001D$  ( $D$  – номинальный размер).

- Для диаметра линзы от 500 мм до 3150 мм допуск рассчитывается как  $k \cdot I$ , где  $I = 0.004D + 2.1$ .

Для качества 6  $k = 10$ , для качества 7  $k = 16$ , для качества 8  $k = 25$ , для качества 9  $k = 40$ . Более подробную информацию вы найдете в ГОСТе 25346-89 на стр. 15.

#### 4.5 Пример

Оформить чертеж оптической детали. Выбрать допуски на размеры, обозначить фаски, покрытия на рабочих гранях и эмалях на нерабочих. Обозначить оптические поверхности, их шероховатости, допуски на форму и расположение. Оформить примечания. Найти  $f'$ ,  $S_f$ ,  $S'_f$ , указать световой диаметр. Дан отрицательный мениск из стекла марки К8 с радиусами  $R_1 = 47.15$  мм и  $R_2 = 28.25$  мм, диаметром 22 мм ( $\Delta D = 0.01$ ), осевая толщина линзы 2.5 мм, крепится резьбовым кольцом. На обе поверхности линзы нанесено просветляющее покрытие из смеси кремниевого и титанового эфиров методом из раствора. На обеих поверхностях есть позиционный допуск на децентрировку ( $C = 0.001$  мм). На поверхности линзы присутствуют дефекты в виде точек диаметром меньше 0.01 мм.

**Дано:**

$R_1 = 47.15$  мм;  $R_2 = 28.25$  мм

$D = 22$  мм,  $\Delta D = 0.01$

$d = 2.5$  мм,  $C = 0.001$  мм

**Найти:**  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $R$ ,  $\Delta R$ ,  $P$ ,  $f'$ ,  $S_f$ ,  $S'_f$ ,  $D_{св}$ -?

**Решение:**

1. Определим фокусное расстояние для данной линзы:

$$k = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (1.518 - 1) \left( \frac{1}{47.15} - \frac{1}{28.25} \right) = -7,36 \cdot 10^{-3}$$

$$f = \frac{1}{k} = -135.864 \text{ мм.}$$

2. Рассчитаем передний и задний фокальные отрезки:

$$S_f = -f \left( 1 + \frac{n-1}{n} * \frac{d}{R_2} \right) = -(-135.864) \left( 1 + \frac{1.518-1}{1.518} * \frac{22}{28.25} \right) = 139,971$$

$$S_{f'} = f \left( 1 + \frac{n-1}{n} * \frac{d}{R_1} \right) = (-135.864) \left( 1 + \frac{1.518-1}{1.518} * \frac{22}{47.15} \right) = -138,325$$

3. Определим величину общих и местных ошибок:

Выбор допуска на форму поверхности производится в зависимости от отношения  $D/D_n$ , где  $D$  – диаметр линзы,  $D_n$  – диаметр рабочего отверстия поверхности этой детали. Чем меньше это отношение, тем меньше допустимое число колец, то есть:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{D}{D_n}\right)^2,$$

где  $N_0 = 0.5 \dots 1$  (для отражающих поверхностей),  $N_0 = 2 \dots 3$  (для преломляющих поверхностей). В нашем случае поверхности преломляющие и  $N_0 = 2$ . Следовательно, величина общей ошибки будет равна:

$$N = 2 \cdot \left(\frac{23.8}{22}\right)^2 = 2$$

Величину местной ошибки чаще всего выбирают на порядок меньше величины общей ошибки:  $\Delta N = \frac{N}{10} = 0.2$ .

4. Обозначим требования к материалу, чистоте поверхности, шероховатости и т.д., то есть заполним верхнюю часть таблицы.

Учитывая, что отрицательный мениск используется как микрообъектив до 40-кратного увеличения, который чувствителен к качеству материала, поставим самые жесткие требования по таким параметрам как показатель преломления (класс 1А), средняя дисперсия (1А), однородность (1), двулучепреломление (1), бесвильность (1А). Требования к пузырьности для микрообъективов ниже, выберем категории 3В, а ослабление будет нормироваться классом 2.

Класс точности пробного стекла  $\Delta R$  выбирается исходя из применения линзы и величин общей и местной ошибок. В нашем случае класс 1.

Класс чистоты  $P$  определяется количеством допустимых дефектов на поверхностях детали. В задании указано, что присутствуют на поверхности точки (то есть у этого дефекта отношение длины к ширине  $<3:1$ ), общей площадью 0.01 мм. Это говорит о том, что мы можем выбрать 1 класс чистоты.

5. На чертеже необходимо обозначить фаски (из справочной литературы выберем в зависимости от диаметра линзы, радиусов и вида крепления. Диаметр линзы 22 мм, вид крепления – резьбовое кольцо, следовательно, на поверхность А нанесем фаску 0.3 мм под углом  $45^\circ$ , а на поверхность Б (так как радиус меньше) - фаска 0.1 мм под углом  $45^\circ$ .

6. Оформим примечания. Необходимо \* обозначить размеры для справок. Следующий пункт примечания – значок, тип и формула покрытия. На обе поверхности линзы нанесено покрытие методом раствора из смеси титана и эфира. Формула такого покрытия – просветл. 44Р.43Р, знак покрытия обозначим на самом чертеже. Последний пункт примечания – нанесение черной эмали на фаски и нерабочие поверхности.



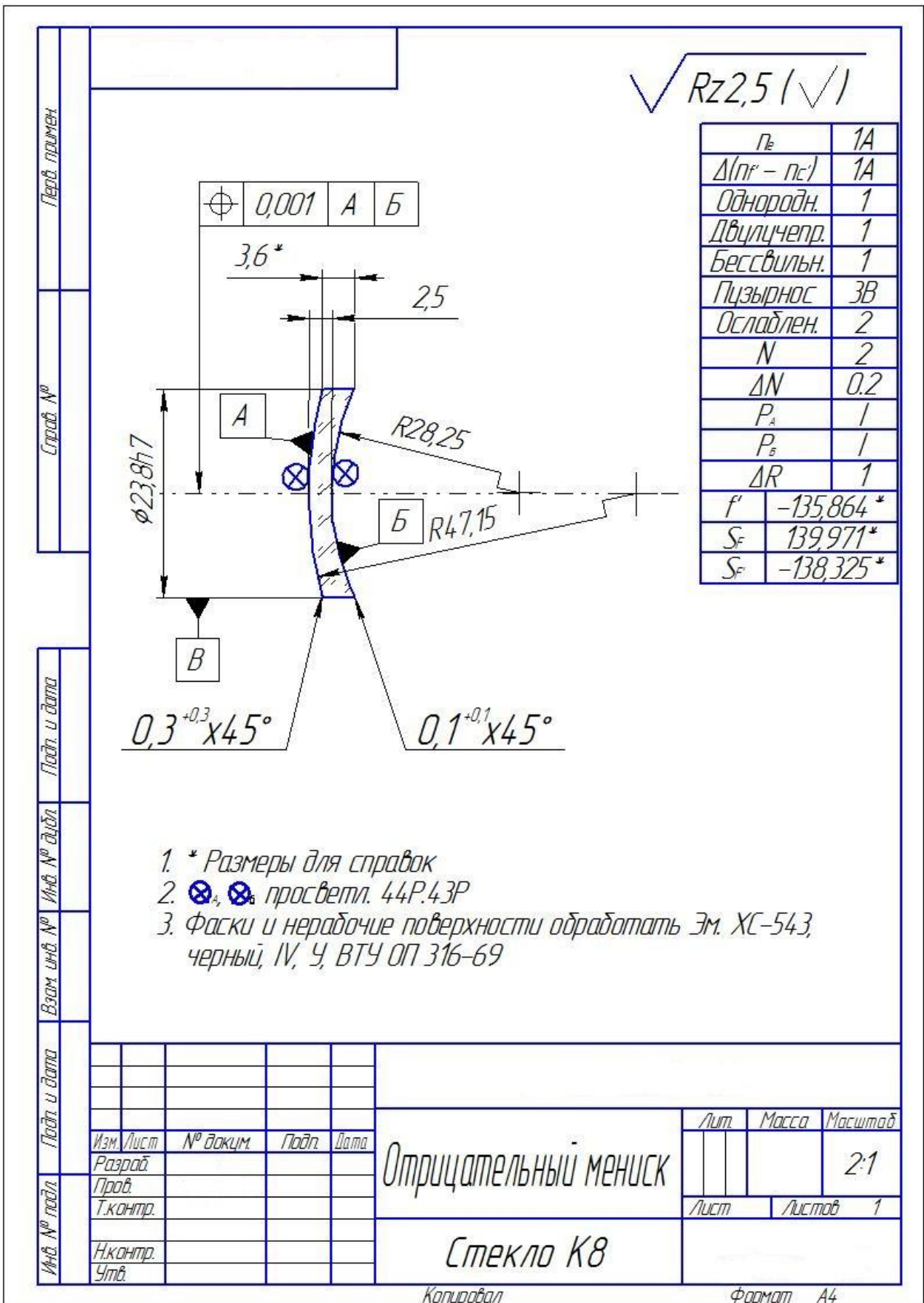


Рисунок 4.1 - Чертеж оптической детали

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №5.

### Определение габаритов заготовки оптической детали

#### 5.1 Формирование размера и выбор вида заготовки линз

Параметры качества заготовок линз и пластин, поставляемых заводами оптического стекла, регламентирует ГОСТ 13240-78Е. В частности он учитывает толщину  $F_{\text{деф}}$  дефектного слоя на верхней ( $F_{\text{деф1}}$ ) и нижней ( $F_{\text{деф2}}$ ) поверхностях заготовки, допустимое отклонение толщины  $\pm\Delta t_3$  и диаметра  $\pm D_3$ . Эти параметры для некоторых видов и размеров заготовок приведены в таблице 5.1:

Таблица 5.1 - Параметры качества заготовок линз и пластин по ГОСТ 13240-78Е

Вид заготовки	Диаметр заготовки $D_3$ , мм	Дефектный слой, $F$ , мм		Допуск $\pm\Delta t_3$ на толщину заготовки, мм	Допуск $\pm\Delta D_3$ на толщину заготовки, мм	Марка стекла
		$F_1$	$F_2$			
Из штабика	8-17	0.5	0.5	+1.0/-0.5	$\pm 0.2$	К, ЛК, БК, Ф, ЛФ, ТФ, ОФ
Прессованная чистовая	12-22	0.5	0.5	+0.3/-0.3	$\pm 0.2$	Ф, ЛФ, ТФ, ОФ
Прессованная шамотная	До 20	0.5	0.8	+1.5/-0.5	$\pm 0.3$	Все марки по ГОСТ 3514-78
	20-50	0.5	0.8	+1.0/-0.5	$\pm 0.3$	
	50-80	0.5	0.8	+1.0/-0.5	$\pm 0.5$	
	80-120	0.8	1.5	+1.5/-0.5	$\pm 0.8$	

Поверхностный слой, содержащий дефекты (шамот, дым, складки, вмятины, приливы, рифли и др.), включают в расчетную толщину  $t_3$  заготовки и устанавливают от верхнего предела допуска  $\Delta t_B$  на толщину  $t$  готовой детали. Для гарантированного удаления этого слоя в процессе механической обработки минусовое значение допуска ( $-\Delta t_3$ ) на толщину заготовки устанавливают от верхней границы поля, занимаемого дефектным слоем, и также включают в расчетную толщину  $t_3$  прессованных заготовок, имеющих приближенную форму детали, равна:

$$t_3 = |t + \Delta t_B + F_{\text{деф1}} + F_{\text{деф2}} + | - \Delta t_3 || \begin{matrix} +\Delta t_3 \\ -\Delta t_3 \end{matrix}. \quad (5.1)$$

Припуск  $\delta_t$  на механическую обработку составляют слагаемые  $F_{\text{деф1}}$ ,  $F_{\text{деф2}}$ ,  $-\Delta t_3$ . Все виды прессованных заготовок диаметром до 10 мм поставляют только в виде плоских круглых пластин, что предусмотрено ГОСТ 13240-78Е. у прессованных заготовок для линз диаметром более 10 мм форма поверхностей зависит от отношения стрелок прогиба  $h$  к диаметру  $D$ . При  $h/D < 0.03$  форма

поверхности – плоскость. У таких заготовок для линз, имеющих вогнутые поверхности, к толщине по центру должна быть прибавлена стрелка (стрелки) прогиба поверхности (поверхностей):

- для плосковогнутой, мениска

$$t_3 = |t + \Delta t_B + h_1 + F_{\text{деф1}} + F_{\text{деф2}} + | - \Delta t_3 || \begin{matrix} +\Delta t_3 \\ -\Delta t_3 \end{matrix}; \quad (5.2)$$

- для двояковогнутой

$$t_3 = |t + \Delta t_B + h_1 + h_2 + F_{\text{деф1}} + F_{\text{деф2}} + | - \Delta t_3 || \begin{matrix} +\Delta t_3 \\ -\Delta t_3 \end{matrix}. \quad (5.3)$$

При отношении  $h/D > 0.03$  форма поверхности (поверхностей) заготовки будет соответствовать форме поверхности (поверхностей) детали, а расчетная толщина  $t_3$  будет определяться по приведенной выше формуле.

Припуск  $\delta_D$  на механическую обработку заготовок линз и пластин по диаметру назначают согласно требованиям ОСТ 3-510-79 (см. таблицу 5.2):

Таблица 5.2 - Припуски на обработку заготовок по диаметру (ОСТ 3-510-79)

Диаметр детали, мм			
До 20	20-50	50-100	100-150
Припуск $\delta_D$ , мм			
1.3	1.5	2.5	3.5

С учетом припуска  $\delta_D$  на обработку и допуска  $\pm D_3$  на изготовление заготовки ее расчетный диаметр равен:

$$D_3 = |D + \delta_D| \begin{matrix} +\Delta D_3 \\ -\Delta D_3 \end{matrix}. \quad (5.4)$$

Получение заготовки любого вида из числа предусмотренных ГОСТ 13240-78Е оговаривается рядом условий. Невыполнение какого-либо из них исключает возможность поставки заготовок данного вида. Некоторые требования представлены в таблице 5.3:

Таблица 5.3 - Требования для заготовок основных видов

Вид заготовки	Марка стекла	Диаметр заготовки, мм	Масса заготовки, г
Из штабика	К, ЛК, БК, Ф, ЛФ, ТФ, ОФ	8-17	0.5-5.0
Чистовые прессованные заготовки	Ф, ЛФ, ТФ, ОФ	12-22	2-10
Шамотные прессованные заготовки-1	все, кроме ОК, ФК, СТК, ТБФ	8-150	0.5-500
Шамотные прессованные заготовки-2	ОК, ФК, СТК, ТБФ	10-50	2-100

Если конструктивные параметры детали и размер партии не позволяют сформировать ни один из рассмотренных видов заготовок, используют кратные заготовки. Согласно стандарту, они могут быть в виде плиток стандартных размеров или в виде прямоугольных плиток нестандартных размеров. При использовании плитки стандартного размера ее раскрой на отдельные заготовки может быть неэкономичным из-за некратности стороны единичной заготовки стороне плитки. Если она к тому же должна быть разрезана и по толщине, то соответственно возрастает объем механической обработки. Этот вид заготовки оправдывает себя в тех случаях, когда мал отход стекла при раскрое или ограничено время между разработкой процесса и запуском имеющихся в наличии заготовок в производство. Более экономичны нестандартные плитки, размеры которых могут быть назначены в соответствии с расчетными. При выборе заготовки следует отдавать предпочтение тому ее виду, который требует меньшего объема механической обработки и меньших потерь стекла. Решение этого вопроса в каждом конкретном случае определяется условиями производства.

Размер  $l$  стороны единичной заготовки, нарезаемой из кратной, с учетом припуска на округливание и центрирование, составляет  $l=1.044D+1.85$  мм, а размер стороны  $L$  кратной заготовки стандартного или нестандартного размера, из которой нарезаются единичные заготовки, -  $L=(2/044D+1.85)M+1.15bn$ , мм ( $M$  – число единичных заготовок, нарезаемых из кратной;  $b$  – ширина алмазного круга, мм;  $1.15$  – коэффициент, учитывающий увеличение ширины пропила из-за торцового биения инструмента;  $n$  – число пропилов на каждой стороне кратной заготовки).

## 5.2 Пример

Выбрать вид и определить расчетную толщину  $t_3$  и расчетный диаметр  $D_3$  заготовки линзы. Диаметр линзы 39 мм, радиусы кривизны соответственно равны 67.5 мм и 76.3 мм.

**Дано:**

$$R_1 = 67.5 \text{ мм}$$

$$R_2 = 76.3 \text{ мм}$$

$$D = 39 \text{ мм}$$

$$t = 17 \text{ мм}$$

**Найти:**  $t_3$ ,  $D_3$ -?

**Решение:**

1. Из таблицы выбираем вид заготовки - прессованная шамотная ->  
 $F_1 = 0.5$  мм,  $F_2 = 0.8$  мм,  $\pm\Delta t_3 = +1.0/-0.5$ ,  $\pm\Delta D_3 = \pm 0.3$ ,  $\delta_D = 1.5$ .
2. Рассчитаем стрелку прогиба:

$$h_1 = |R_1| - \sqrt{R_1^2 - \frac{D^2}{4}}; h_1 = 2.9$$

3. Так как  $h/D > 0.03$ , то расчетная толщина заготовки будет равна:

$$t_3 = |t + \Delta t_B + F_{\text{деф1}} + F_{\text{деф2}} + (-\Delta t_3)|_{-\Delta t_3}^{+\Delta t_3},$$

$$t_3 = |17 + 1 + 0.5 + 0.8 + |-0.5||_{-0.5}^{+1} = 19.8_{-0.5}^{+1} \text{ мм}$$

4. Определим диаметр заготовки:

$$D_3 = |D + \delta_D|_{-\Delta D_3}^{+\Delta D_3} \rightarrow D_3 = |39 + 1.5|_{-0.3}^{+0.3} = 40.5_{-0.3}^{+0.3}$$

**Ответ:**  $t_3 = 19.8_{-0.5}^{+1}$  мм,  $D_3 = 40.5_{-0.3}^{+0.3}$  мм, прессованная шамотная заготовка.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №6.

### Пооперационное распределение припуска на механическую обработку заготовок линз и пластин

При изготовлении оптической детали припуск на механическую обработку по толщине  $\delta_t$  распределяется между всеми операциями, предусмотренными технологическим процессом. В общем случае обработка преломляющих и отражающих поверхностей заготовок разных видов включает операции предварительного шлифования, тонкого шлифования и полирования. Таким образом:

$$\delta_t = F_1 + F_2 + |-\Delta t_3| \text{ [мм]}. \quad (6.1)$$

#### 6.1 Предварительное шлифование

Толщина прессованных заготовок пластин и линз всех типов, которые имеют приближенную форму будущей детали, после предварительного шлифования 1-й поверхности определяется по формуле, мм:

$$t_3^{\text{п.ш.1}} = |t_3 - F_1 + F^{\text{п.ш.1}}|_{-\Delta t_n}, \quad (6.2)$$

где  $\Delta t_n$  – минусовой допуск на толщину детали, мм.

Заготовки для изготовления плосковогнутых, двояковогнутых линз и менисков, у которых отношение стрелки прогиба вогнутой (вогнутых) поверхности к диаметру меньше 0.03, то есть  $h/D_3 < 0.03$ , поставляются в виде плоских дисков. После шлифования первой (вогнутой) поверхности заготовка должна иметь толщину:

$$t_3^{\text{п.ш.1}} = |t_3 - h - F_1 + F^{\text{п.ш.1}}|_{-\Delta t_n}. \quad (6.3)$$

Толщина  $F^{\text{п.ш.1}}$  слоя стекла, нарушаемого при шлифовании алмазным инструментом, равна:

$$F^{\text{п.ш.1}} = (0.001d_{3A}^2 + 0.5d_{3A} + 4) \cdot \frac{1.25}{K_T}, \quad (6.4)$$

где  $d_{3A}$  – наибольший размер (мкм) зерна основной фракции алмаза в инструменте. При шлифовании заготовок с  $h/R < 0.7$ , используют инструмент с зернистостью алмаза 63/50.

Если предварительное шлифование выполнялось свободным абразивом зернистости  $M$ , то толщину  $F_M^{\text{п.ш.1}}$  нарушенного слоя на стекле марки  $x$  (мкм) находят умножением ее значения для стекла марки К8 на коэффициент относительной твердости по сошлифовыванию, соответствующий стеклу марки  $x$ , то есть:

$$F_M^{\text{п.ш.1}} = F_M^{\text{К8}} \cdot \frac{1.25}{K_T^x}. \quad (6.5)$$

Это выражение справедливо для оценки толщины слоя стекла, нарушенного как предварительным, так и тонким шлифованием.

Толщина заготовок пластин и линз всех типов после предварительного шлифования второй поверхности равна:

$$t_3^{\text{п.ш.2}} = |t + \Delta t_B + 2F^{\text{п.ш.1}}|_{-\Delta t_n}, \text{ [мм]}. \quad (6.6)$$

## 6.2 Тонкое шлифование и полирование

Припуск на операции тонкого шлифования ( $\delta^{\text{тш}}$ ) и полирования ( $\delta^{\text{п}}$ ) равен сумме толщин нарушенного слоя на 1-ой и 2-ой поверхностях, то есть:

$$\delta^{\text{тш}} + \delta^{\text{п}} = 2F^{\text{тш}}_{d_{3.a.}} [\text{мм}].$$

После тонкого шлифования 1-ой и 2-ой поверхностей способом поверхностного притира с использованием алмазного инструмента, толщина заготовок, собранных в блок, составляет:

$$t_3^{\text{тш}} = t + \Delta t_B + 2F^{\text{тш}}_{d_{3.a.}} \cdot \frac{1.25}{K_T}. \quad (6.7)$$

Значение  $F^{\text{тш}}_{d_{3.a.}}$  определяется по формуле для оценки  $F^{\text{п.ш.1}}$  при предварительном шлифовании. При шлифовании блоков диаметром более 200 мм зернистость алмаза в алмазосодержащих элементах последнего перехода – 14/10, а у блоков диаметром менее 200 мм – 10/7.

Если операция выполнялась с использованием свободного абразива, то толщина заготовок после последнего перехода равна:

$$t_3^{\text{т.ш.}} = t + \Delta t_B + 2F^{\text{к8}}_{\text{мп}} \cdot \frac{1.25}{K_T}. \quad (6.8)$$

Толщина слоя стекла, нарушаемого микропорошками, которые могут быть использованы для последнего перехода  $F^{\text{к8}}_{\text{мп}} = 12.5$  мкм (абразив М14) и  $F^{\text{к8}}_{\text{мп}} = 9$  мкм (абразив М10).

Припуск  $\delta^{\text{п}}$  на полирование равен толщине слоя стекла, нарушенного абразивом последнего перехода операции тонкого шлифования, независимо от способа ее выполнения (алмазный инструмент, свободный абразив):

$$\delta^{\text{п}} = 2F^{\text{тш}} [\text{мкм}] \quad (6.9)$$

После выполнения операции полирования толщина заготовки должна быть равна толщине  $t$  готовой детали с допуском  $\pm \Delta t$ , то есть:

$$t_3 = t \pm \Delta t [\text{мм}]. \quad (6.10)$$

## 6.3 Пример

Рассчитать припуск на механическую обработку заготовки линзы из штабика, изготовленного из стекла марки ТФ10 толщиной 1.73 мм, радиусами кривизны 8.75 мм, диаметром 3.8 мм. Толщина готовой детали составляет 0.7 мм.

**Дано:**

$$t_3 = 1.73 \text{ мм}, t = 0.7 \text{ мм}$$

$$K_T = 0.5$$

$$R = 8.75 \text{ мм}, D = 3.8 \text{ мм}$$

**Найти:**  $t_3^{\text{п.ш.1}}$ ,  $t_3^{\text{п.ш.2}}$ ,  $t_3^{\text{т.ш.-}}$  ?

**Решение:**

1. В соответствии с толщиной и видом заготовки припуск на механическую обработку  $\delta_t$  равен:

$$\delta_t = F_1 + F_2 + |-\Delta t_3| = 0.5 + 0.5 + 0.5 = 1.5 \text{ мм}$$

Этот припуск распределяют между всеми последовательно выполненными операциями механической обработки преломляющих и отражающих поверхностей.

2. Толщина  $F^{п.ш.1}$  слоя стекла, нарушаемого при шлифовании алмазным инструментом, равна:

$$F^{п.ш.1} = (0.001d_{3A}^2 + 0.5d_{3A} + 4) \cdot \frac{1.25}{K_T} = (0.001 \cdot 100^2 + 0.5 \cdot 100 + 4) \cdot \frac{1.25}{0.5} = 161 \text{ мкм},$$

$$F^{п.ш.1} = (0.001d_{3A}^2 + 0.5d_{3A} + 4) \cdot \frac{1.25}{K_T} = (0.001 \cdot 80^2 + 0.5 \cdot 80 + 4) \cdot \frac{1.25}{0.5} = 126 \text{ мкм},$$

$$F^{п.ш.1} = (0.001d_{3A}^2 + 0.5d_{3A} + 4) \cdot \frac{1.25}{K_T} = (0.001 \cdot 63^2 + 0.5 \cdot 80 + 4) \cdot \frac{1.25}{0.5} = 100 \text{ мкм},$$

где  $d_{3a}$  – наибольший размер (мкм) зерна основной фракции алмаза в инструменте при шлифовании заготовок с  $h\backslash R < 0.7$ , используют инструмент с зернистостью алмаза 100/80, 80/63, 63/50.

3. После предварительного шлифования первой поверхности толщина заготовки линзы равна:

$$t_3^{п.ш.1} = |t_3 - F_1 + F^{п.ш.1}|_{-\Delta t_H} = |1.73 - 0.5 + 0.161|_{-0.02} = 1.39_{-0.02} \text{ мм},$$

$$t_3^{п.ш.1} = |t_3 - F_1 + F^{п.ш.1}|_{-\Delta t_H} = |1.73 - 0.5 + 0.126|_{-0.02} = 1.36_{-0.02} \text{ мм},$$

$$t_3^{п.ш.1} = |t_3 - F_1 + F^{п.ш.1}|_{-\Delta t_H} = |1.73 - 0.5 + 0.1|_{-0.02} = 1.3_{-0.02} \text{ мм}.$$

4. Толщина заготовки после предварительного шлифования второй поверхности равна:

$$t_3^{п.ш.2} = |t + \Delta t_B + 2F^{п.ш.1}|_{-\Delta t_H} = |0.7 + 0.02 + 2 \cdot 0.161|_{-0.02} = t_3^{п.ш.2} = 1.04_{-0.02} \text{ мм},$$

$$t_3^{п.ш.2} = |t + \Delta t_B + 2F^{п.ш.1}|_{-\Delta t_H} = |0.7 + 0.02 + 2 \cdot 0.126|_{-0.02} = t_3^{п.ш.2} = 0.97_{-0.02} \text{ мм},$$

$$t_3^{п.ш.2} = |t + \Delta t_B + 2F^{п.ш.1}|_{-\Delta t_H} = |0.7 + 0.02 + 2 \cdot 0.1|_{-0.02} = t_3^{п.ш.2} = 0.92_{-0.02} \text{ мм}.$$

5. При шлифовании блоков диаметром менее 200 мм зернистость алмаза в алмазосодержащих элементах последнего перехода 10/7. Толщина слоя стекла, нарушаемого при тонком шлифовании равна:

$$F^{т.ш.1} = (0.001d_{3A}^2 + 0.5d_{3A} + 4) \cdot \frac{1.25}{K_T} = (0.001 \cdot 10^2 + 0.5 \cdot 10 + 4) \cdot \frac{1.25}{0.5} = 23 \text{ мкм}.$$

6. После тонкого шлифования первой и второй поверхностей способом поверхностного притира с использованием алмазного инструмента, толщина заготовок, собранных в блок:

$$t_3^{тш} = t + \Delta t_B + 2F^{т.ш.1} \cdot \frac{1.25}{K_T} = 0.7 + 0.02 + 2 \cdot 23 \cdot \frac{1.25}{0.5} \cdot 10^{-3} = 0.78 \text{ мм}.$$



7. Припуск  $\delta^{\text{П}}$  на полирование равен толщине слоя стекла, нарушенного абразивом последнего перехода операции тонкого шлифования:

$$\delta^{\text{П}} = 2F^{\text{т.ш.1}} = 2 \cdot 23 = 46 \text{ мкм.}$$

8. После выполнения операции полирования толщина заготовки должна быть равна толщине  $t$  готовой детали с допуском  $\pm\Delta t$ :

$$t_3 = t \pm \Delta t = 0.7 \pm 0.02 \text{ мм.}$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №7.

### Расчет расположения оптических элементов на плоском и сферическом блоках

При расчете блоков последовательно решают несколько задач, а именно: выбирают оптимальную схему расположения заготовок на приспособлении, определяют число одновременно обрабатываемых заготовок, находят размеры блока и клеочного приспособления. Рассчитанный блок должен обеспечивать размещение на приспособлении возможно большего числа заготовок и равномерное заполнение ими поверхности последнего. Первое условие направлено на повышение производительности, второе – на увеличение точности формы поверхности каждой детали. Этим требованиям удовлетворяют три схемы размещения заготовок на плоском и сферическом блоках, а именно: в первом (центральном) ряду устанавливают одну ( $n_1 = 1$ ), три ( $n_1 = 3$ ) или четыре ( $n_1 = 4$ ) заготовки.

#### 7.1 Расчет плоского блока

При реализации схемы с  $n_1 = 3$  и  $n_1 = 4$  в центре блока образуется свободная зона радиусом  $r$ :

$$r = \frac{D_3}{2\left(\frac{1}{\sin\varphi} - 1\right)}. \quad (7.1)$$

Данному расположению заготовок в первом ряду соответствуют углы  $\varphi$ , равные  $\varphi_{n_1=3} = 60^\circ$  и  $\varphi_{n_1=4} = 45^\circ$ . При этом радиусы свободной зоны будут равны:

$$r_{n_1=3} = \frac{0.1547D_3}{2}; \quad r_{n_1=4} = \frac{0.414D_3}{2}. \quad (7.2)$$

Выразив зависимость радиуса  $r$  от числа заготовок в 1-м ряду через безразмерный коэффициент  $c = \frac{r}{D_3}$ , значения последнего будут соответственно  $c_{n_1=3} = 0.077$  и  $c_{n_1=4} = 0.207$ .

При  $n_1 = 1$  свободной зоны в центре блока нет. В этом случае коэффициент  $c$  принимает значение  $c_{n_1=i} = -0.5$ .

Для определения размера плоского блока выбирают типоразмер станка, на котором он будет обрабатываться. Наиболее распространенными для выполнения операции тонкого шлифования и полирования способом притира являются станки типа ШП, в шифре которых (ШП-50, ШП-100, ШП-200, ШП-320 и др.) цифровой индекс характеризует максимальный диаметр  $D_{\text{пл.бл}}$  плоского блока (мм), который может быть обработан на данном станке. Тот или иной типоразмер станка выбирают исходя из размера детали и партии заготовок, запускаемой в обработку.

Зная максимальный диаметр блока, находят число  $l$  размещаемых на нем заготовок с  $n_{1=i}$ , равным 1; 3; 4:

$$l_{n_1=i} = \frac{D_{\text{пл.бл}}}{2(D_3 + b)} - c_{n_1=i}, \quad (7.3)$$

где  $b$  – промежуток между заготовками и рядами,  $b = \frac{D_3}{(3+0.3D_3)}$ .

За оптимальную принимают схему с наибольшим числом  $l$  рядов заготовок.

Для определения числа  $n_j$  заготовок в каждом ряду находят угол  $\varphi_i$  раствора заготовки, а по нему определяют  $n_j$ , то есть:

$$\varphi_i = \arccos \frac{\sqrt{(i-1+c)(i+c)}}{(i-0.5+c)}; n_i = \frac{180^\circ}{\varphi_i}. \quad (7.4)$$

Если дробная часть числа  $l$  рядов заготовок и числа заготовок в ряду будет больше 0.98, то их значения округляют до целого в большую сторону, что возможно за счет уменьшения промежутка  $b$ , то есть более плотного размещения заготовок. Если же дробные части  $l$  и  $n_i$  окажутся меньше 0.98, округление до целого производят в меньшую сторону. Округление в большую сторону требует существенного уменьшения промежутка  $b$ , малое значение или отсутствие которого может быть источником технологических потерь на операциях тонкого шлифования и полирования.

Расчет завершают определением диаметра  $D_{\text{бл}}$  блока и общего числа  $M$  заготовок на нем:

$$D_{\text{бл}} = 2(l + c_{n_1=i})(D_3 + b); M = \sum_{i=1}^l n_i \quad (7.5)$$

Коэффициент заполнения блока, определяемый как отношение суммарной площади заготовок к площади блока, для разных схем расположения заготовок в первом ряду (при числе рядов от 7 до 15) изменяется в пределах от 0.770 до 0.778. Поэтому, приняв значение коэффициента для блоков с числом  $l$  рядов более 8 равным 0.774, можно по приближенной формуле рассчитать число заготовок на блоке:

$$M = 3.1(l + c_{n_1=i})^2. \quad (7.6)$$

## 7.2 Расчет сферического блока

При расчете сферического блока используют ряд положений расчета плоского блока, а именно:

- принимают те же схемы расположения заготовок в первом (центральном) ряду блока, а именно:  $n_1 = 1, n_1 = 3, n_1 = 4$ ;
- для выполнения операций тонкого шлифования и полирования используют станки ШП различных типоразмеров.

С точки зрения эффективного использования мощности станков ШП желательно, чтобы сферические блоки были равны полусфере. Однако процесс формообразования поверхности заготовок на блоках таких размеров усложняется, поскольку нормальная составляющая  $P_n$  усилия  $P$ , с которым обрабатываемая поверхность и инструмент прижаты друг к другу, изменяется по закону  $P_n = P \cos \gamma_{\text{бл}}$ . С увеличением значения  $\gamma_{\text{бл}}$  это значение уменьшается и при  $\gamma_{\text{бл}} = 180^\circ$  равняется нулю. Изнашивание краевой зоны заготовок нижнего ряда будет происходить лишь за счет относительной скорости перемещения блока и инструмента. Исходя из целесообразности выравнивания давления по поверхности блока и тем самым повышения точности формообразования, высоту блока, характеризуемую углом раствора  $\gamma_{\text{бл}}$ , ограничивают.

Диаметр сферического блока  $D_{\text{сф.бл}}$  условно принимают равным двум радиусам обрабатываемой поверхности, то есть  $D_{\text{сф.бл}} = 2R$ . Выбирают типоразмер станка ШП (ШП-50, ШП-100, ШП-200) и сравнивают максимальный диаметр обрабатываемого на нем плоского блока  $D_{\text{пл.бл}}$  с диаметром сферического блока  $D_{\text{сф.бл}}$ . Если  $D_{\text{сф.бл}} < 0.9D_{\text{пл.бл}}$ , то угол раствора  $\gamma_{\text{бл}}$  рассчитывают по формуле:

$$\gamma_{\text{бл}} = \frac{5600}{R+60} + 88^\circ. \quad (7.7)$$

Если же  $D_{\text{сф.бл}} > 0.9D_{\text{пл.бл}}$ , то для расчета  $\gamma_{\text{бл}}$  используют выражение

$$\gamma_{\text{бл}} \leq 2 \arcsin \frac{0.9D_{\text{пл.бл}}}{2R}. \quad (7.8)$$

Положение заготовок на блоке определяют два угла: угол  $\theta$ , характеризующий положение заготовок в саггитальной плоскости, и угол  $\varphi$  раствора заготовок в меридиональной плоскости.

1. Определяют углы  $\theta$  для первого ряда заготовок, устанавливаемых по схемам расположения 1-3-4:

При  $n_1 = 1$  угол  $\theta_1 = 0$ ;

$$\text{При } n_1 = 3 \text{ угол } \theta_{31} = \arctg \sqrt{\frac{4B}{3-B}}; \quad (7.9)$$

$$\text{При } n_1 = 4 \text{ угол } \theta_{41} = \arctg \sqrt{\frac{2B}{1-B}}.$$

Здесь  $B = \left(\frac{D_3+b}{2R_p}\right)^2$ , где  $R_p$  – расчетный радиус блока ( $R_p = R_t - t_3$ ).

Значения углов  $\theta$  для последующих рядов, независимо от числа заготовок к первому ряду, равны:

$$\theta_i = \theta_1 + 2\theta_y(i-1), \text{ где } \theta_y = \arctg \frac{D_3+b}{2R_p}. \quad (7.10)$$

2. Пользуясь найденными значениями углов  $\gamma_{\text{бл}}$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_{31}$ ,  $\theta_{41}$ , определяют число рядов заготовок при их расположении в первом ряду по схемам 1-3-4:

$$l_{ni=1} = 1 + \frac{\gamma_{\text{бл}} - \theta_y}{2\theta_y}; \quad l_{ni=3} = 1 + \frac{\gamma_{\text{бл}} - \theta_{31} - \theta_y}{2\theta_y}; \quad l_{ni=4} = 1 + \frac{\gamma_{\text{бл}} - \theta_{41} - \theta_y}{2\theta_y}. \quad (7.11)$$

3. Углы  $\varphi$  при числе заготовок в первом ряду  $n_1 = 3$  и  $n_1 = 4$  равны соответственно  $60^\circ$  и  $45^\circ$ . Для остальных рядов углы  $\varphi$  рассчитывают по формуле:

$$\text{tg } \varphi_i = \sqrt{\frac{\text{tg}^2 \theta_i + 1}{\frac{\text{tg}^2 \theta_{i-1}}{B} - 1}}. \quad (7.12)$$

4. Число  $n_i$  заготовок по рядам и их общее количество  $M$  на блоке:

$$n_i = \frac{180^\circ}{\varphi_i}, \text{ шт. } M = \sum_{i=1}^l n_i. \quad (7.13)$$

Если, как и при расчете плоского блока, дробная часть числа  $n_i$  заготовок в ряду и числа  $l$  рядов больше 0.98, их округляют в большую сторону, что возможно за счет уменьшения промежутка между заготовками и рядами. Если же дробные части  $n_i$  и  $l_i$  меньше 0.98, то, так же и при расчете плоского блока, их округляют в меньшую сторону.

### 7.3 Определение параметров наклеечного приспособления

Выбрав схему установки заготовок в первом ряду, которая обеспечивает размещение на блоке максимально возможного числа рядов и соответственно наибольшего числа одновременно обрабатываемых заготовок, находят диаметр  $D_{\text{бл}}$  сферического блока, его высоту  $H_{\text{бл}}$ , а также диаметр  $D_{\text{н.п}}$  и высоту  $H_{\text{н.п}}$  наклеечного приспособления:

$$D_{\text{бл}} = 2R_{\text{бл}} \sin\left(\frac{\gamma_{\text{бл}}}{2}\right); H_{\text{бл}} = R_{\text{бл}} \left(1 - \cos\left(\frac{\gamma_{\text{бл}}}{2}\right)\right); \quad (7.14)$$

$$D_{\text{н.п}} = 2R_{\text{н.п}} \sin\left(\frac{\gamma_{\text{бл}}}{2}\right); H_{\text{н.п}} = R_{\text{н.п}} \left(1 - \cos\left(\frac{\gamma_{\text{бл}}}{2}\right)\right). \quad (7.15)$$

Радиус  $R_{\text{н.п}}$  рабочей поверхности наклеечного приспособления и расчетный радиус  $R_p$  блока определяют по формулам, предоставленным в таблице ниже. Найденное при расчете блока расположение заготовок в центральной зоне не зависит от способа его сборки (эластичного или жесткого).

Таблица 7.1 - Расчет радиусов  $R_{\text{н.п}}$  наклеечных приспособлений и радиусов  $R_p$  блока

Форма поверхностей заготовки	Формулы для расчета $R_{\text{н.п}}$	Формулы для расчета $R_p$
$R_1$ – выпуклая; $R_2$ – плоская; $R_1$ – выпуклая; $R_2$ – выпуклая	$R_1 - t_3 - t_{\text{см}}$	$R_1 - t_3$ $R_1 - t_3 + h_2$
$R_1$ – выпуклая; $R_2$ – вогнутая; ( $R_1 < R_2$ ); $R_1$ – выпуклая; $R_2$ – вогнутая; ( $R_1 > R_2$ )	$\sqrt{\frac{D_3^2}{4} + (R_1 - t_3 - h_2)^2} - t_{\text{см}}$	$R_1 - t_3 - h_2$
$R_1$ – вогнутая, $R_2$ – плоская	$\sqrt{\frac{D_3^2}{4} + (R_1 + t_3)^2} + t_{\text{см}}$	$R_1 - h_1$
$R_1$ – вогнутая, $R_2$ – вогнутая	$\sqrt{\frac{D_3^2}{4} + (R_1 + t_3 + h_2)^2} + t_{\text{см}}$	
$R_1$ – вогнутая; $R_2$ – вогнутая; ( $R_1 < R_2$ ); $R_1$ – вогнутая; $R_2$ – выпуклая; ( $R_1 > R_2$ )	$R_1 + t_3 + t_{\text{см}}$	

Примечание: в таблице приняты следующие обозначения, мм:  $R_1$  – радиус обрабатываемой поверхности;  $D_3$  – диаметр заготовки;  $t_3$  – толщина заготовки;  $h_1, h_2$  – стрелки прогиба 1-й и 2-й поверхностей соответственно;  $h_{1(2)} = R_{1(2)} - \sqrt{R_{1(2)}^2 - \frac{D_3^2}{4}}$ ,  $t_{\text{см}}$  – толщина смоляной подушки,  $t_{\text{см}} = 0.05D_3 + 1.0$ .

### 7.4 Пример 1

Расчитать диаметр плоского блока и общего числа заготовок на нем, угол раствора блока, толщину, размер и высоту наклеечного приспособления для обработки линзы диаметром 8.7 мм, радиусом 5.521 мм и толщиной заготовки 3.43 мм.

**Дано:**

$$D_3 = 8.7 \text{ мм}$$

$$R = 5.521 \text{ мм}$$

$$t_3 = 3.43 \text{ мм}$$

**Найти:**  $D_{\text{пл.бл}}$ ,  $M$ ,  $\gamma_{\text{бл}}$ ,  $R_{\text{нп}}$ ,  $D_{\text{нп}}$ ,  $H_{\text{нп}}$  -?

**Решение:**

Для определения плоского блока выбирают типоразмер станка, на котором он будет обрабатываться. Наиболее распространенными для выполнения операций тонкого шлифования и полирования способом притира являются станки ШП.

Выбираем максимальный диаметр равный 50 мм, типоразмер станка ШП-50. Находим число  $l$  размещаемых на нем рядов с  $n(l=i) = 1, 3, 4$ .

$$l_{n1=i} = \frac{D_{\text{пл.бл}}}{2(D_3+b)} - c_{n1=i}, \quad b = \frac{D_3}{3+0.3D_3} = \frac{8.7}{3+0.3 \cdot 8.7} = 1.55.$$

$$l(n_1 = 1) = \frac{50}{2(8.7 + 1.55)} - (-0.5) = 2.94$$

$$l(n_1 = 3) = \frac{50}{2(8.7 + 1.55)} - 0.0773 = 2.36$$

$$l(n_1 = 4) = \frac{50}{2(8.7 + 1.55)} - 0.207 = 2.23$$

За оптимальную принимают схему с наибольшим числом  $l$  рядов заготовок, то есть  $n = 1$ . Определим число  $n_i$  заготовок в каждом ряду и угол  $\varphi_i$  раствора заготовок.

$$\varphi_i = \arccos \frac{\sqrt{(i-1+C)(i+C)}}{(i-0.5+C)};$$

$$\varphi_1 = \arccos \frac{\sqrt{(2-1-0.5)(2-0.5)}}{(2-0.5-0.5)} = 30^\circ$$

$$n_i = \frac{180^\circ}{\varphi_1} = \frac{180^\circ}{30^\circ} = 6.$$

Определим диаметр  $D_{\text{пл.бл}}$  и общего числа заготовок  $M$  на нем:

$$D_{\text{пл.бл}} = 2(l+C) \cdot (D_3 + b) = 2(2.94 - 0.5)(8.7 + 1.55) = 50.02 \text{ мм}$$

$$M = \sum_{i=1}^l n_i = 1 + 6 = 7 \text{ шт,}$$

$$\gamma_{\text{бл}} = \frac{5600}{R + 60} + 88^\circ = 165^\circ 28'$$

Толщина слоя наклеечной смолы:  $t_{\text{см}} = 0.05D_3 + 1.0 = 5.35 \text{ см}$ .

Диаметр наклеечного приспособления:  $D_{\text{нп}} = 2R \cdot \sin(\gamma/2) = 10.95 \text{ мм}$

Радиус наклеечного приспособления:

$$R_{\text{нп}} = \sqrt{\frac{D_3^2}{4} + (R_1 + t_3)} + t_{\text{см}} = \sqrt{\frac{8.7^2}{4} + (5.521 + 3.43)} + 5.35 = 10.63 \text{ мм.}$$

Высота наклеечного приспособления:

$$H_{\text{нп}} = R_{\text{нп}} \left(1 - \cos \frac{\gamma}{2}\right) = 10.63 \left(1 - \cos \left(\frac{165^\circ 28'}{2}\right)\right) = 8.73 \text{ мм.}$$

## 7.5 Пример 2

Рассчитать диаметр и угол раствора сферического блока, общее число заготовок на нем, толщину, размер и высоту наклеечного приспособления для обработки линзы диаметром 3.8 мм, радиусами 8.75 мм и 1.4191 мм, толщиной заготовки 0.7 мм.

**Дано:**

$$D_3 = 3.8 \text{ мм}$$

$$t_3 = 0.7 \text{ мм}$$

$$R_1 = 8.75 \text{ мм}$$

$$R_2 = 1.4191 \text{ мм}$$

**Найти:**  $D_{\text{сф.бл}}$ ,  $M$ ,  $\gamma_{\text{сф.бл}}$ ,  $R_{\text{нп}}$ ,  $D_{\text{нп}}$ ,  $N_{\text{нп}}$  -?

**Решение:**

### I. Расчет для поверхности А.

1. Диаметр сферического блока условно принимается:

$$D_{\text{сф.бл}} = 2 \cdot R = 2 \cdot 8.75 = 17.5 \text{ мм};$$

2. Угол раствора:

$$\gamma_{\text{бл}} = \frac{5600}{R+60} + 80^\circ = \frac{5600}{8.75+60} + 80^\circ = 161^\circ.$$

3. Определим угол  $\theta$ , характеризующий положение заготовок в саггитальной плоскости:

$$\theta_{11} = 0; \theta_{31} = \sqrt{\frac{4B}{3-B}}; B = \left(\frac{D_3+b}{2R_p}\right)^2;$$

$$R_p = R_t - t_3 = 8.75 - 0.7 = 8.05 \text{ мм}; b = \frac{D_3}{3+0.3D_3} = \frac{3.8}{3+0.3 \cdot 3.8} = 0.92;$$

$$B = \left(\frac{3.8+0.92}{2 \cdot 8.75}\right)^2 = 0.073; \theta_{31} = \text{arctg} \sqrt{\frac{4 \cdot 0.073}{3-0.073}} = 5.7^\circ$$

Угол  $\theta$  для  $n_i = 4$  определяем по формуле:

$$\theta_{41} = \text{arctg} \sqrt{\frac{2B}{1-B}} = \text{arctg} \sqrt{\frac{2 \cdot 0.073}{1-0.073}} = 9^\circ.$$

4. Углы  $\theta$  для последующих рядов, независимо от числа заготовок в первом ряду составляют:

$$\theta_i = \theta_1 + 2\theta_y(i-1),$$

$$\text{где } \theta_y = \text{arctg} \frac{D_3+b}{2R_p} = \text{arctg} \frac{3.8+0.92}{2 \cdot 8.05} = 16.3^\circ.$$

При  $n_i = 3$ :

$$\theta_2 = 5.7^\circ + 2 \cdot 16.3^\circ \cdot (2-1) = 38^\circ,$$

$$\theta_3 = 5.7^\circ + 2 \cdot 16.3^\circ \cdot (3-1) = 71^\circ,$$

При  $n_i = 4$ :

$$\theta_2 = 9^\circ + 2 \cdot 16.3^\circ \cdot (2-1) = 42^\circ,$$

$$\theta_3 = 9^\circ + 2 \cdot 16.3^\circ \cdot (3-1) = 74^\circ,$$

$$\theta_4 = 9^\circ + 2 \cdot 16.3^\circ \cdot (4-1) = 107^\circ.$$

5. Пользуясь найденными значениями углов  $\gamma_{\text{бл}}$ ,  $\theta_y$ ,  $\theta_{31}$ ,  $\theta_{41}$ , определяем число рядов заготовок при их расположении в первом ряду:

$$l_{n_1=3} = 1 + \frac{\frac{\gamma_{6л} - \theta_{31} - \theta_y}{2}}{2\theta_y} = 1 + \frac{\frac{161}{2} - 5.7 - 16.3}{2 \cdot 16.3} = 2.79,$$

Так как дробная часть меньше 0.98, то число рядов заготовок округляем до 2.

$$l_{n_1=4} = 1 + \frac{\frac{\gamma_{6л} - \theta_{41} - \theta_y}{2}}{2\theta_y} = 1 + \frac{\frac{161}{2} - 9 - 16.3}{2 \cdot 16.3} = 2.69,$$

Так же, как и в первом случае, число рядов заготовок округляем до 2.

6. Углы  $\varphi$  при числе заготовок в первом ряду  $n_1 = 3$  и  $n_1 = 4$  равны соответственно  $60^\circ$  и  $45^\circ$ . Для остальных рядов углы  $\varphi$  рассчитываем по формуле:

$$\varphi_i = \arctg \sqrt{\frac{tg^2 \theta_i + 1}{\frac{tg^2 \theta_i}{B} - 1}}$$

Число заготовок по рядам и их общее количество на блоке рассчитываем по формуле:

$$n_i = \frac{180^\circ}{\varphi_i}; M = \sum_{i=1}^l n_i.$$

Получаем при  $n_i = 3$ :  $\varphi_1 = 60^\circ$  и  $n_1 = \frac{180^\circ}{60^\circ} = 3$ ;  $\varphi_2 = 44^\circ$  и  $n_2 = \frac{180^\circ}{44^\circ} = 4$ .  
 $M = 3 + 4 = 7$  шт.

При  $n_i = 4$ :  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $n_1 = \frac{180^\circ}{45^\circ} = 4$ ;  $\varphi_2 = 32^\circ$  и  $n_2 = \frac{180^\circ}{32^\circ} = 6$ .  $M = 4 + 6 = 10$  шт.

Выбираем схему установки заготовок  $n_i = 4$  в первом ряду, так как она обеспечивает наибольшее количество одновременно обрабатываемых заготовок на блоке.

7. Диаметр  $D_{сф.бл}$  сферического блока:

$$D_{сф.бл} = 2R \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = 2 \cdot 8.75 \cdot \sin \frac{161^\circ}{2} = 17.26 \text{ мм}$$

Высота  $H_{сф.бл}$  сферического блока:

$$H_{сф.бл} = R \left( 1 - \cos \frac{\gamma_{6л}}{2} \right) = 8.75 \left( 1 - \cos \frac{161^\circ}{2} \right) = 7.3 \text{ мм.}$$

## II. Расчет для поверхности Б.

Расчет сферического блока для данной поверхности ввиду малого радиуса невозможен. Детали обрабатываются поштучно на станках типа 5ШП-30, 10П-32.

8. Рассчитаем размеры наклеечных приспособлений для эластичного способа сборки сферического блока:

Стрелка прогиба для поверхности Б:

$$h_2 = R_2 - \sqrt{R_2^2 - \frac{D_3^2}{4}} = 1.4191 - \sqrt{1.4191^2 - \frac{3.8^2}{4}} = 0.06 \text{ мм.}$$

Толщина слоя наклеечной смолы:

$$t_{cm} = 0.05D_3 + 1.0 = 0.05 \cdot 3.8 + 1.0 = 1.19 \text{ мм.}$$



Размер наклеечного приспособления для обработки выпуклой поверхности определяется:

$$R_{\text{нп}} = \sqrt{\frac{D_3^2}{4} + (R_1 - t_3 - h_2)^2} - t_{\text{см}} = \sqrt{\frac{3.8^2}{4} + (8.75 - 2.22 - 0.06)^2} - 1.19 = 5.55 \text{ мм.}$$

Диаметр наклеечного приспособления:

$$D_{\text{нп}} = 2R \cdot \sin \frac{\gamma_{\text{бл}}}{2} = 2 \cdot 8.75 \cdot \sin \frac{161^\circ}{2} = 17.26 \text{ мм.}$$

Высота наклеечного приспособления:

$$H_{\text{нп}} = R_{\text{нп}} \cdot \left(1 - \cos \frac{\gamma_{\text{бл}}}{2}\right) = 5.55 \cdot \left(1 - \cos \frac{161^\circ}{2}\right) = 4.63 \text{ см.}$$

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №8.

### Определение габаритов фасок, изготавливаемых на оптических элементах

#### 8.1 Центрирование линз

Применимость способа центрирования с установкой линзы между двумя соосно установленными и синхронно вращающимися патронами зависит от величины угла  $\varphi$ . Последний связан с радиусами  $R_1$  и  $R_2$  поверхностей линзы соотношением:

$$\varphi = \varphi_1 \pm \varphi_2 = \arcsin \frac{D_{П1}}{2R_1} \pm \arcsin \frac{D_{П2}}{2R_2}, \quad (8.1)$$

Здесь  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  [град] – углы наклона касательных к первой и второй поверхностям линзы;  $D_{П1}$  и  $D_{П2}$  – диаметры центрировочных патронов со стороны радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , [мм]; знак «+» берется для двояковыпуклых и двояковогнутых линз, знак «-» - для остальных типов линз.

С уменьшением угла  $\varphi$  точность центрирования снижается (см табл. 8.1):

Таблица 8.1 - Точность центрирования в зависимости от угла зажатия

Угол зажатия $\varphi$ [град]	>23	23-18	18-12	<12
Точность центрирования [мм]	>0.005	0.005-0.01	0.01-0.02	<0.02

Для проверки применимости данного метода центрирования к конкретной линзе рассчитывают соответствующий ее конструктивным параметрам угол  $\varphi$  и сравнивают обеспечиваемую им точность центрирования с заданной на чертеже. Если последняя меньше полученной по расчетному углу  $\varphi$ , используют установку с фиксацией положения линзы приклеиванием к патрону и контролем положения по прибору.

Диаметры  $D_{П1}$  и  $D_{П2}$  центрировочных патронов должны быть на 1.0-1.5 мм меньше световых диаметров поверхностей  $R_1$  и  $R_2$ .

Для обработки линз по диаметру используют алмазные круги формы АПП1 и АПП2 по ОСТ 3-6007-85. Профильные круги формы АППК применяют при центрировании с одновременным фасетированием. Углы наклона режущей кромки у таких кругов могут быть 30; 45; 60°.

Характеристики алмазных кругов формы АПП1, АПП2 и АППК назначают в зависимости от диаметра линзы приведены в таблице 8.2, приведенной ниже:

Таблица 8.2 - Зернистость и концентрация алмазного порошка в зависимости от диаметра линзы

Диаметр линзы, мм	<20	20-40	40-100	>100
Зернистость алмазного порошка по ГОСТ 9206-80Е	АСМ 28/20	АСМ 40/28	АС2 50/40	АС2 63/50
Концентрация алмазного порошка, %	100			

## 8.2 Фасетирование линз

Если фасетирование линз является самостоятельной операцией, для ее выполнения используют чашки алмазные формы АЧ по ОСТ 3-6007-85 с радиусами от 2.4 до 1000 мм. До радиуса 95 мм их изготавливают в виде полусферы, а радиусами с 115 мм – меньше полусферы. Толщина алмазосодержащего слоя составляет 1.0 мм, зернистость алмаза в инструменте от 63/50 до 50/40, концентрация 100%. Радиус  $R_{\phi}$  фасетировочной чашки зависит от угла  $\alpha$  наклона фаски, где  $D_{\text{л}}$  – диаметр линзы (пластинки), мм (см. табл. 8.3).

Таблица 8.3 - Зависимость радиуса фасетировочной чашки от угла наклона режущей кромки

$\alpha$	30°	45°	60°
$R_{\phi}$	0.58 $D_{\text{л}}$	0.71 $D_{\text{л}}$	$D_{\text{л}}$

## 8.3 Пример

Рассчитать угол зажатия, точность центрирования, выбрать соответствующие алмазные и профильные круги для центрирования линзы, в зависимости от диаметра линзы выбрать зернистость и концентрацию алмазного порошка абразива. Диаметр двояковогнутой линзы 34.5 мм, радиусы соответственно равны -80.62 мм и 130.62 мм, децентрирование  $C = 0.05$  мм. Также подобрать радиус фасетировочной чашки в зависимости от угла наклона режущей кромки.

**Дано:**

$$D_3 = 34.5 \text{ мм}$$

$$R_1 = -80.62 \text{ мм}$$

$$R_2 = 130.62 \text{ мм}$$

**Найти:**  $\phi$ ,  $C$ ,  $R_{\phi 1}$ ,  $R_{\phi 2}$ -?

**Решение:**

1. Для центрирования применяются два метода центрирования: в зажимных патронах (механический метод) и метод установки линзы по блику. Наиболее прогрессивным является механический метод в зажимных патронах. Однако этот метод не подходит для линз с малой кривизной рабочих поверхностей, поэтому при выборе метода центрирования необходимо произвести расчет критического угла зажима. Для двояковыпуклой или двояковогнутой линзы он рассчитывается по формуле и должен быть больше критического.

$$\phi_{\text{крит}} \geq 17^\circ; \phi = \arcsin \frac{d_1}{2R_1} + \arcsin \frac{d_2}{2R_2},$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – диаметры зажимных патронов со сторон соответствующих радиусов кривизны поверхностей линз. Они меньше механического диаметра готовой линзы на 0.2-0.5 мм. Для линз с плоскими фасками  $d_1$  и  $d_2$  не равны.

2. Точность центрирования проверяется по формуле:

$$C = \frac{0.01}{\varphi - 7},$$

здесь  $\varphi$  – угол зажима в градусах. Полученную величину сравнить с указанным на чертеже или в задании требованием к децентрированию. Для операции центрирования используются круги типа 1А1.

3. Определим возможность обрабатываемости линзы в зажимных патронах:

$$D_1 = D_2 = D_3 - 0.2 = 34.5 - 0.2 = 34.3 \text{ мм}$$

$$\varphi = \arcsin \frac{34.3}{2 \cdot 80.62} + \arcsin \frac{34.3}{2 \cdot 130.62} = 12.28 + 7.54 = 19.82^\circ$$

$$19.82^\circ > 17^\circ$$

При таком угле зажима возможно применение механического метода. Точность центрирования линзы в зажимных патронах равна согласно формуле:

$$C = \frac{0.01}{19.82^\circ - 7} = 0.0078 \text{ мм.}$$

- это величина меньше, чем указанная децентрировка ( $C = 0.05$  мм.) Для обработки линзы по параметрам выбираем круг 1А1, АС6, зернистость 50/40 с концентрацией 100%.

4. Для предохранения деталей от выколов во время обработки и эксплуатации острые кромки между рабочей и цилиндрической поверхностью необходимо притупить, то есть произвести фасетирование. Эта операция проводится на станке СД-120. Он предназначен для доводочных операций и нанесения фасок на плоских и сферических поверхностях. Радиус фасетировочной чаши определяется по формуле:

$$R_\phi = \frac{D_0}{2 \cos \alpha},$$

где  $\alpha$  – угол фаски.

Если  $D/R < 0.4$ , то  $\alpha = 45^\circ$ ;  $0.4 < D/R < 0.7$ , то  $\alpha = 40^\circ$ ;  $0.7 < D/R < 1$ , то  $\alpha = 35^\circ$ .

$$D_1/R_1 = 34.5/80.62 = 0.42$$

$$D_1/R_2 = 34.5/130.62 = 0.26.$$

В нашем случае фаски должны быть расположены под углами  $40^\circ$  и  $45^\circ$  к оси линзы соответственно. Следовательно, радиусы фасетировочной чаши равны:

$$R_{\phi 1} = \frac{34.5}{2 \cos(40^\circ)} = \frac{34.5}{1.53} = 22.52 \text{ мм;}$$

$$R_{\phi 2} = \frac{34.5}{2 \cos(45^\circ)} = \frac{34.5}{1.41} = 24.4 \text{ мм;}$$

Учитывая близость размеров, радиус фасетировочной чаши для обработки обеих поверхностей примем 24 мм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Кузнецов С.М., Путилин Э.С., Лисицын Ю.В. и др.*, Оптическая технология, СПб: СПбГУ ИТМО, 2006 г.
2. *Петровский Г.Т.*, Каталог «Бесцветное оптическое стекло», Москва: Дом оптики, 1990 г.
3. *Петровский Г.Т.*, Каталог «Цветное оптическое стекло и особые стекла», Москва: Дом оптики, 1990 г.
4. *Окатов М.А., Антонов М.А., Байгожин А. и др.*, Справочник технолога-оптика под ред. М.А.Окатова – 2-е изд, издательство «Политехника», СПб., 2004 г.
5. *Ландсберг Г.С.*, Оптика, изд. 6, Москва: Физмалит, 2006 г.
6. *Цуканова Г. И.*, Прикладная оптика, часть 1, конспект лекций, СПб: СПбГУ ИТМО, 2008 г.
7. *Свешникова И. С., Запрягаева Л.А., Гузеева И.В., Филонов А. С.*, Основы геометрической оптики, М: Шико, 2009 г.
8. *Панов В.М.*, Справочник конструктора опτικο-механических приборов, М.: Машиностроение, 2000 г.
9. *Быков Б.З., Перов В.А.*, Оформление рабочих чертежей оптических деталей и выбор допусков на оптические детали, М:МГТУ им. Баумана, 2007 г.
10. *Латыев С. М.*, Конструирование точных оптических приборов, СПб: Лань, 2015 г.
11. *Толстоба Н. Д., Цуканов А. А.*, Проектирование узлов оптических приборов, СПб:СПГУ ИТМО, 2002 г.

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ОПТОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И МАТЕРИАЛОВ**

**1994 г.:** Организована базовая кафедра СПбГУ ИТМО при ГОИ им. С.И.Вавилова – кафедра оптического материаловедения. Образование кафедры явилось логичным развитием тесных связей, которые в течение многих лет существовали между ГОИ и ИТМО. В частности, для преподавания в ИТМО широко привлекались ведущие сотрудники ГОИ, а ИТМО был постоянным источником молодых кадров для ГОИ. Кафедра начала подготовку специалистов по образовательному направлению «Оптотехника», специальность «Оптические технологии и материалы».

**1999 г.:** На кафедре созданы три направления: оптическое материаловедение, информа-ционная оптотехника, физическая оптика и спектроскопия. Кафедра переименована в кафедру оптического материаловедения и оптики (ОМиО).

**2002 г.:** Кафедра ОМиО вошла в состав нового факультета СПбГУ ИТМО – Фотоники и оптоинформатики.

**2004 г.:** Кафедра явилась одним организаторов создания нового образовательного направ-вления подготовки бакалавров и магистров – «Фотоника и оптоинформатика». Подготовка бакалавров и магистров по направлению – «Фотоника и оптоинформатика».

**2005 г.:** Переименование в кафедру оптоинформационных технологий и материалов (ОТиМ).

**с 2006 г.:** Кафедра ОТиМ – лидер в России по подготовке специалистов по оптическому материаловедению. Совместные научные исследования с зарубежными компаниями Corning (USA), Samsung (Korea), PPG Inc. (USA), Oxford Instruments Analytical (Germany).

**2007 г.:** Первый выпуск бакалавров по направлению «Фотоника и оптоинформатика».

**2007 г.:** Кафедра ОТиМ – участник выполнения инновационной образовательной программы в СПбГУ ИТМО «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», реализуемой в рамках Приоритетных Национальных Проектов «Образование».

**2009 г.:** Кафедра ОТиМ - участник выполнения программы развития ИТМО в 2012 - 2018 гг.

**2013 г.:** Кафедра ОТиМ - участие в программе повышения конкурентоспособности НИУ ИТМО среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013-2020 гг.

**2008, 2009, 2010, 2012, 2013 гг.:** Кафедра ОТиМ победитель конкурса ведущих научно-педагогических коллективов НИУ ИТМО (1, 2, и 3 места).

**2012 г.:** К кафедре ОТиМ присоединена кафедра оптических технологий.

**2013 г.:** Кафедра ОТиМ участник Программы повышения конкурентоспособности НИУ ИТМО. При кафедре создана международная лаборатория «Advanced Photonic Materials and Technologies».

**2011-2014 г.:** Кафедра ОТиМ награждена дипломами и медалями многочисленных международных выставок: “OPTICS-EXPO-2012”, “Photonics. World of Lasers and Optics” (2011, 2013, 2014), «ВУЗПРОМЭКСПО -2013».

Губанова Людмила Александровна  
Константинова Юлия Андреевна

## **Оптические технологии**

**Учебно-методическое пособие**

В авторской редакции  
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО  
Зав. РИО  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова



**Редакционно-издательский отдел**  
**Университета ИТМО**  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49