

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

Кафедра «Лазерная техника и технология»

А. С. Козерук  
В. О. Кузнечик

# ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-38 01 02  
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

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

Минск  
БНТУ  
2023

УДК 681.7.02(075.8)

ББК 34.96я7

К59

**Р е ц е н з е н т ы:**

зав. кафедрой технологии стекла и керамики

УО «Белорусский государственный технологический университет»,

канд. техн. наук, доцент *Ю. Г. Павлюкевич*;

начальник технологического бюро завода «Сфера» (БелОМО)

*И. П. Пашкевич*

**Козерук, А. С.**

К59      Технология производства оптических деталей : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-38 01 02 «Опτικο-электронные и лазерные приборы и системы» / А. С. Козерук, В. О. Кузнечик. – Минск : БНТУ, 2023. – 100 с.  
ISBN 978-985-583-893-8.

Изложена технология изготовления типовых оптических деталей, включая детали с асферическими поверхностями. Рассмотрены требования к оптическим деталям. Описан контроль основных параметров оптических деталей. Приведены современные методы получения деталей из стекла. Материалы учебно-методического пособия могут быть использованы при разработке курсовых проектов и дипломных работ.

УДК 681.7.02(075.8)

ББК 34.96я7

ISBN 978-985-583-893-8

© Козерук А. С., Кузнечик В. О., 2023

© Белорусский национальный  
технический университет, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
Глава 1. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	7
1.1. Шлифующие абразивы естественного и искусственного происхождений .....	7
1.2. Зернистость и зерновой состав абразивов.....	7
1.3. Регенерация абразивов.....	9
1.4. Полирующие порошки.....	10
Глава 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	11
2.1. Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) .....	11
2.2. Материалы для блокирования .....	11
2.3. Материалы для изготовления полировальников .....	12
2.4. Материалы для защитных покрытий и оптические клеи.....	13
Глава 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ШЛИФОВАНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ СТЕКЛА .....	15
3.1. Действие абразивных зерен на стекло в процессе шлифования .....	15
3.2. Влияние основных технологических факторов на процесс шлифования .....	16
3.2.1. <i>Действие жидкости</i> .....	16
3.2.2. <i>Природа, величина и количество абразивных зерен</i> .....	17
3.2.3. <i>Материал шлифовальника и скорость его вращения</i> .....	18
3.3. Обработка стекла связанным шлифующим абразивом .....	19
3.4. Сущность процесса полирования стекла .....	20
3.5. Влияние основных технологических факторов на производительность процесса полирования .....	22
3.5.1. <i>Природа подложки полировальника</i> .....	22
3.5.2. <i>Температура поверхности стекла и окружающей среды</i> .....	23
Глава 4. ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ДЕТАЛЯМ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ .....	25
4.1. Чертежи оптических деталей .....	25
4.2. Показатели качества деталей.....	26
4.3. Виды операций обработки стекла.....	29
Глава 5. БЛОКИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.....	31
5.1. Требования к блокировке оптических деталей и к наклеечным веществам .....	31

5.2. Блокировка заготовок при предварительной обработке (склеивание столбиков) .....	33
5.3. Способ эластичной блокировки линз .....	33
5.4. Способ жесткой блокировки линз .....	35
5.5. Блокировка высокоточных деталей .....	36
5.6. Блокировка призм и пластин оптическим контактом .....	37
Глава 6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ .....	
6.1. Резание стекла .....	40
6.2. Раскалывание, распиливание и кругление стекла .....	40
6.3. Сверление и высверливание стекла .....	41
6.4. Алмазные абразивные круги .....	42
6.5. Типовые формы алмазного инструмента и его изготовление .....	44
Глава 7. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ .....	
7.1. Обработка по методу свободного притирания .....	46
7.2. Обработка по методу «Синхроспид» .....	46
7.2.1. <i>Сущность метода</i> .....	46
7.2.2. <i>Обработка плоских поверхностей</i> .....	48
7.2.3. <i>Обработка сферических поверхностей</i> .....	50
7.3. Магнитореологическое полирование оптических деталей .....	51
7.3.1. <i>Сущность метода</i> .....	51
7.3.2. <i>Основы технологии магнитореологического полирования</i> .....	52
Глава 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ .....	
8.1. Проектирование технологических процессов .....	53
8.2. Технология изготовления плоскопараллельных пластин и клиньев .....	54
8.2.1. <i>Грубое и среднее шлифование (фрезерование)</i> .....	54
8.2.2. <i>Мелкое шлифование</i> .....	57
8.2.3. <i>Полирование</i> .....	58
8.2.4. <i>Доводка в сепараторах</i> .....	61
8.2.5. <i>Контроль плоскостности и клиновидности полированных пластин</i> .....	63

8.3. Технология изготовления призм .....	66
8.3.1. Грубое и среднее шлифование (предварительная обработка) .....	66
8.3.2. Контроль угловых размеров шлифовальных призм .....	69
8.3.3. Мелкое шлифование и полирование (окончательная обработка) .....	70
8.3.4. Контроль полированных призм .....	72
8.4. Технология изготовления линз .....	74
8.4.1. Грубое и среднее шлифование линз .....	74
8.4.2. Мелкое шлифование и полирование линз .....	78
8.4.3. Центрирование линз .....	79
8.5. Контроль линз .....	82
8.5.1. Контроль формы поверхности контактными методами .....	82
8.5.2. Контроль формы поверхности бесконтактными методами .....	85
8.5.3. Контроль центрировки .....	88
8.6. Соединение оптических деталей .....	89
8.6.1. Склеивание .....	89
8.6.2. Соединение методом глубокого оптического контакта .....	91
Глава 9. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ .....	93
9.1. Способы формообразования асферических оптических деталей .....	93
9.1.1. Вакуумное моллирование .....	93
9.1.2. Вакуумная асферизация .....	94
9.1.3. Обработка способом линейного соприкосновения (обработка ножевым инструментом) .....	95
9.2. Контроль асферических поверхностей .....	96
9.2.1. Контактные методы .....	96
9.2.2. Компенсационный (бесконтактный) метод .....	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	100

## ВВЕДЕНИЕ

В оптическом приборостроении в странах как ближнего, так и дальнего зарубежья существует две разновидности технологий обработки оптических деталей – это технология формообразования, в процессе которой обеспечивают заданные геометрические параметры изделия и минимизируют его макропогрешность, и технология коррекции, предназначенная для устранения микропогрешностей на полированной поверхности. К первым из названных технологий относятся классический метод свободного притирания и метод «Синхроспид», а ко вторым – магнитореологическая, плазменная, лазерная, ионная и струйная обработки. Эти технологии коррекции предназначены для минимизации локальных погрешностей на исполнительных поверхностях оптических деталей, предварительно сформированных с применением технологии формообразования. Для исправления общей погрешности технологии коррекции не применяются из-за низкой их производительности. Данные погрешности устраняют на стадии полирования прецизионных поверхностей изделий оптического приборостроения. Следовательно, технологии формообразования в общей цепочке обработки оптических деталей являются *необходимыми* и для большинства деталей современных оптических приборов широкого применения *достаточно точными*. По технологии формообразования локальные погрешности на поверхности линз уменьшают доводкой их на обычных рычажных шлифовально-полировальных станках. Коррекции подвергаются только линзы для оптических приборов специального назначения, в частности для метрологических приборов, высокотехнологичных кинокамер, лазерных систем мегаджоулевого класса и т. п.

В настоящем учебно-методическом пособии рассматриваются операции изготовления оптических деталей по классической технологии свободного притирания, который позволяет достичь наилучшего совпадения обработанной поверхности с эталонной плоской или сферической.

## Глава 1. АБРАЗИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 1.1. Шлифующие абразивы естественного и искусственного происхождения

К шлифующим абразивам относятся кварцевый песок, корунд, карбиды кремния и бора, электрокорунд, алмаз.

*Корунд* (природный материал) состоит в основном из глинозема ( $Al_2O_3$ ) в количестве 70–90 % и примесей (железа, хрома, титана), которые определяют его окраску.

*Карбид кремния* (карборунд, SiC) получают при плавлении смеси угля с кварцевым песком.

*Карбид бора* ( $B_4C$ ) получают плавлением смеси борного ангидрида и кокса. По твердости карбид бора близок к алмазу.

*Электрокорунд* ( $Al_2O_3$ ) представляет собой кристаллический глинозем, который получают электроплавкой боксита. Электрокорунд бывает разных цветов: наивысший сорт – белый, корунд худшего качества имеет розовый, коричневый или черный цвета.

*Алмаз* (природный и синтетический) представляет собой кристаллическую модификацию углерода. Его применяют в виде единичных жестко закрепленных зерен (для резания), в виде порошка, спрессованного и спеченного с металлическим или иным порошком (для фрезерования), и в свободном состоянии в виде паст и суспензий для полирования некоторых кристаллов.

### 1.2. Зернистость и зерновой состав абразивов

Абразивные материалы (порошки), кроме алмаза и карбида бора, в зависимости от способа классификации делятся на два класса. К первому классу относятся абразивные материалы, получаемые рассевом на ситах, ко второму классу – гидроклассификацией (зерна абразива различного размера выносятся из сосуда потоком воды, движущейся с различной скоростью). Абразивные материалы первого класса делят на две группы – шлифзерно и шлифпорошки, продукты второго класса называют микропорошками. Каждая из этих групп делится на порошки разной зернистости, которым присвоены номера, соответствующие нижнему размеру зерен основной фракции (табл. 1.1).

Таблица 1.1

## Классификация абразивных материалов

Классы	Группа абразива	Обозначение зернистости	Размер зерна основной фракции, мкм	Задерживается на сите с размером стороны ячейки в свету, мкм	Область применения
I	Шлиф-зерно	25	315–250	250	Грубое шлифование (обдирка) $Rz \approx 80-16$ мкм
		20	250–200	200	
		16	200–160	160	
	Шлиф-порошки	12	160–125	125	Среднее шлифование $Rz \approx 16-1,0$ мкм
		10	125–100	100	
		8	100–80	80	
		6	80–63	63	
5	63–50	50			
4	50–40	40			
40–28	28				
II	Микропорошки	M63	63–50		
		M40	40–28		
		M28	28–20		
		M20	20–14		Мелкое шлифование $Ra \approx 1,0-0,04$ мкм
		M14	14–10		
		M10	10–7		
		M7	7–5		
M5	5–3				

В зерновой состав порошков входят следующие фракции: основная (определяет интенсивность шлифования и составляет 30–40 % от общего числа зерен), предельная и крупная (определяют шероховатость шлифуемой поверхности), мелкая (не оказывает влияния на процесс обработки).

Качество абразивных порошков оценивают по их шлифующей способности и шероховатости обработанной поверхности. Шлифующую способность характеризуют массой материала, сошлифованного с образца стекла определенного размера за определенное время.

Порошки природного и синтетического алмазов разделены на две группы: шлифпорошки и микропорошки. Шлифпорошки



природного алмаза имеют одну марку – А, синтетического – пять марок: АСО, АСП, АСВ, АСК, АСС (АС – алмаз синтетический; О, Р, В, К, С – индексы типов порошков, отличающихся физико-химическими свойствами). В состав алмазных шлифпорошков входят три фракции: крупная, основная и мелкая. Зернистость порошка установлена по основной фракции, обозначаемой дробью, у которой числитель – размер (мкм) стороны ячейки верхнего сита, знаменатель – размер (мкм) стороны ячейки нижнего сита.

Микропорошки природных алмазов имеют марки АМ и АН, синтетических – АСМ и АСН (М – medium – средний, Н – high – высокий). Микропорошки бывают следующей зернистости: 60/40, 40/28, 28/20, 20/14, 14/10, 10/7, 7/5, 5/3, 3/2, 2/1, 1/0.

Микропорошок марки АСМ с размером зерен меньше 0,7 мкм используют для изготовления субмикропорошков (АСМ 0,7/0, 0,5/0 и 0,3/0), которые применяют при обработке кварца, рубина, полупроводниковых кристаллов, металлов и некоторых оптических материалов.

Оптические детали шлифуют водными суспензиями абразивных порошков. Концентрацию суспензии выражают соотношением весовых количеств жидкой (вода) и твердой (абразив) фаз и обозначают Ж : Т. Обычно Ж : Т принимают в пределах 3–5.

### 1.3. Регенерация абразивов

Абразивные зерна в процессе обработки стекла разрушаются, размельчаются и загрязняются осколками разрушенного стекла, металлом шлифовальника, а также различными органическими примесями. Однако если отработанный абразивный материал очистить от загрязнений и проклассифицировать по крупности, то его снова можно использовать для обработки стекла.

Совокупность действий для очистки и классификации использованного абразива называют *регенерацией*.

Отходы металла и органических веществ, загрязняющие абразив, удаляют обработкой его кислотами HCl или H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Значительно сложнее обстоит дело с очисткой абразива от осколков стекла. Отделить зерна от осколков стекла с помощью водной классификации невозможно, так как их плотность почти одинакова. Разрушение же стекла в воде может быть осуществлено только с помощью плавиковой

кислоты, которая является вредной и поэтому не применяется. Однако, как установлено, шлифующая способность абразива заметно не понижается при содержании в нем сошлифованного стекла примерно до 50 %, поэтому при регенерации абразивов стекло не удаляют.

#### 1.4. Полирующие порошки

Полирующие порошки (окислы некоторых металлов) применяют для удаления следов шлифования с поверхности стекла до приобретения ею прозрачности с необходимой степенью чистоты. Полирующие порошки должны обладать: твердостью в пределах 5–7 единиц по шкале Мооса; размером зерен в пределах 0,8–1,4 мкм; отсутствием в порошке царапающих примесей; малой смачиваемостью жидкостью суспензии (для улучшения закрепляемости зерен на подложке полировальника).

Качество полирующих порошков оценивают по их полирующей способности или относительной полирующей способности (ОПС).

Рассмотрим основные полирующие материалы.

*Окись хрома* ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ). Для обработки стекла полирующая способность окиси хрома недостаточна, однако этот порошок хорошо полирует кристаллы и металлы менее твердые, чем стекло. Окись хрома в виде паст (паста ГОИ) используется для доводочных и притирочных работ в металлообработке. ОПС – 0,5.

*Крокус* ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Используют при полировании деталей из стекла, чистота поверхности которых должна соответствовать первому классу чистоты. ОПС – 1.

*Полирит* состоит из оксидов редкоземельных металлов и является основным полирующим абразивом, который используют при изготовлении оптических деталей. ОПС – 1,5.

*Двуокись циркония* ( $\text{ZrO}_2$ ). Применяется для полирования стекол повышенной твердости марки СТК. ОПС – 1,2–2,0.

*Алмазные микропорошки* АСМ и АСН зернистостей 3/2–1/0 и субмикрпорошки зернистостей 0,7/0–0,3/0 используют при полировании деталей из особо твердых материалов и металлов.

## **Глава 2. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

### **2.1. Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ)**

Обработка оптических деталей (ОД) сопровождается выделением тепла и продуктов обработки (шлама), что отрицательно влияет на производительность труда, срок службы инструмента и качество обработанной поверхности.

Отвод тепла и шлама осуществляют применением СОЖ, которая также участвует в разрушении стекла путем физико-химического воздействия.

При обработке ОД алмазным инструментом и абразивными кругами эффективно используют СОЖ, состоящую из эмульсола (отходы масляного производства), керосина осветительного и воды. В процессе использования алмазного инструмента происходит его засаливание, причиной чему является взаимодействие частиц разрушенного стекла со связкой инструмента. При этом частицы стекла замедляют износ связки и удаление затупившихся зерен алмаза. В результате режим самозатачивания инструмента нарушается, и он теряет режущую способность. Взаимодействие стекла со связкой уменьшают, вводя в состав СОЖ вещества (например, кальцинированную соду), которые адсорбируются на связке данного состава лучше, чем стекло.

При центрировании линз алмазным инструментом в качестве СОЖ используют жидкие масла (веретенное или вазелиновое). Для центрирования линз из неналетоопасных стекол могут быть применены водосодержащие эмульсии, но при этом шероховатость обработанной поверхности увеличивается.

При шлифовании и полировании оптических деталей свободным абразивом роль СОЖ выполняют водные абразивная и полировочная суспензии (смесь порошков с водой).

### **2.2. Материалы для блокирования**

Для закрепления заготовок оптических деталей на приспособлениях при шлифовании и полировании применяют наклейные вещества, такие как наклейные смолы, воск, парафин, шеллак, гипс и другие материалы.

*Наклеечные смолы* – это сплавы канифоли, пека, воска, парафина и шеллака, взятых в заданном соотношении для получения необходимой вязкости.

*Канифоль* – продукт переработки сосновой смолы (живицы). Температура размягчения 65–80 °С. Смолы с большим содержанием канифоли обладают большей твердостью и более высокой температурой размягчения.

*Пек древесный* – продукт переработки дегтя деревьев хвойных пород. Температура размягчения 50–60 °С.

*Воск пчелиный* – мягкое кристаллическое вещество. Температура размягчения 65 °С. Устойчив к действию кислот, в том числе плазиковой.

*Парафин* – продукт переработки нефти и бурого угля. Температура размягчения в среднем 50 °С. Парафин часто используют для наклейки (склеивания) деталей на заготовительных операциях.

*Шеллак* (естественная смола) – продукт биологической деятельности насекомых. Температура размягчения 90 °С. Входит в состав некоторых особо прочных смол. Его также применяют для склеивания малогабаритных деталей на заготовительных операциях.

Все перечисленные вещества растворяются в бензине и ацетоне, а шеллак – в спирте и щелочах.

Процесс приготовления смол сводится к получению однородной массы сплавлением исходных компонентов с последующим введением наполнителей (мел, тальк, гипс, древесные опилки), которые добавляют для увеличения прочности и уменьшения усадки смол.

*Наклеечный воск* – сплав канифоли (80–90 %) и воска (20–10 %). Используется для склеивания заготовок между собой и крепления их на приспособлениях при заготовительных операциях.

*Наклеечный парафин* – сплав парафина (15–20 %) и воска (85–80 %). Используются на заготовительных операциях.

*Гипс* – мелкозернистый порошок, водный раствор которого затвердевает и удерживает заготовки в блоке (силами трения и адгезии).

### **2.3. Материалы для изготовления полировальников**

Полировальники изготавливают нанесением на металлические планшайбы, грибы и чашки смоляных, волокнистых или синтетических подложек. Смоляные полировальники позволяют получать

наиболее точные поверхности оптических деталей, но при этом необходимо использовать неинтенсивные режимы обработки.

Волокнистые материалы используют для изготовления так называемых суконных полировальников. Ткань на металлическую основу инструмента приклеивают смолой. Суконные полировальники допускают интенсивные процессы полирования и обеспечивают высокую оптическую чистоту обрабатываемых поверхностей, но используются для изготовления деталей с низкими требованиями к точности формы.

Синтетические вещества с микропористой структурой, например пенополиуретан, на металлическую основу инструмента наклеивают специальным клеем, стойким к промывочным жидкостям и суспензиям. Достоинством таких полировальников является высокая износостойкость. Это свойство полировальников позволяет вести обработку оптических деталей при интенсивных режимах.

## **2.4. Материалы для защитных покрытий и оптические клеи**

Для предохранения полированных поверхностей от механических повреждений при последующей обработке используют защитные покрытия. Они должны иметь хорошую адгезию к оптическим деталям, химически не взаимодействовать с материалом детали, смолами, абразивами и легко смываться после обработки.

В оптическом производстве используют защитные покрытия лаками и эмалями. Для защиты полированных поверхностей деталей наиболее распространена нитроэмаль НЦ-25. Для этих же целей применяют лак «Цапон». Вспомогательные поверхности оптических деталей для улучшения их эксплуатационных свойств (устранения бликов, уменьшения светорассеяния), а также для защиты фасок от механических поверхностей покрывают черной матовой эмалью ПФ-163. Лаки и эмали наносятся кистью.

Клеи для соединения оптических деталей друг с другом должны обладать максимальной прозрачностью, высокой оптической однородностью, близостью показателей преломления клея и соединяемых деталей, обладать механической прочностью, морозостойкостью, теплостойкостью и способностью не деформировать склеенные детали.

В оптической промышленности наиболее широко используются следующие клеи: бальзам, бальзамин, бальзамин-М, ОК-50П, ОК-60, ОК-72ФТ, клей УФ-235М и акриловый клей.

*Бальзам* – прозрачная естественная смола (живица) пихтовых деревьев. В нормальном состоянии бальзам – это твердое вещество. Жизнеспособность клея в расплавленном состоянии – не более 8 ч, в твердом состоянии – от шести месяцев и больше. Клей применяется для склеивания шкал и сеток с фотослоем. Он обладает невысокой влагостойкостью и малой прозрачностью в ультрафиолетовой области спектра.

*Бальзамин*. Используют для склеивания оптических деталей для приборов, подвергающихся вибрациям и перепадам температур. Недостаток бальзамина – деформирование оптических деталей.

*Бальзамин-М*. Характеристики клея такие же, как бальзамина, но он не деформирует оптические детали.

*ОК-50П*. Используют для соединения деталей с оптическими покрытиями, работающих в тропиках (повышенная влага). Токсичен.

*ОК-60*. Невлагостойкий. Прозрачен в ИК области спектра (до 7,5 мкм).

*Клей УФ-235М*. Используется для соединения деталей, работающих в ультрафиолетовой области спектра.

*Акриловый клей*. Применяется для соединения стекла с металлом.

Перечисленные клеи, кроме бальзамина, являются синтетическими веществами.

## Глава 3. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ШЛИФОВАНИЯ И ПОЛИРОВАНИЯ СТЕКЛА

### 3.1. Действие абразивных зерен на стекло в процессе шлифования

Моделируя работу абразивного зерна при помощи стального шарика, английский ученый Престон показал, что при давлении на неподвижный шарик в стекле образуется коническая трещина (рис. 3.1, *а*), а при перекатывании шарика – сеть трещин, образующих *поврежденный* слой стекла.

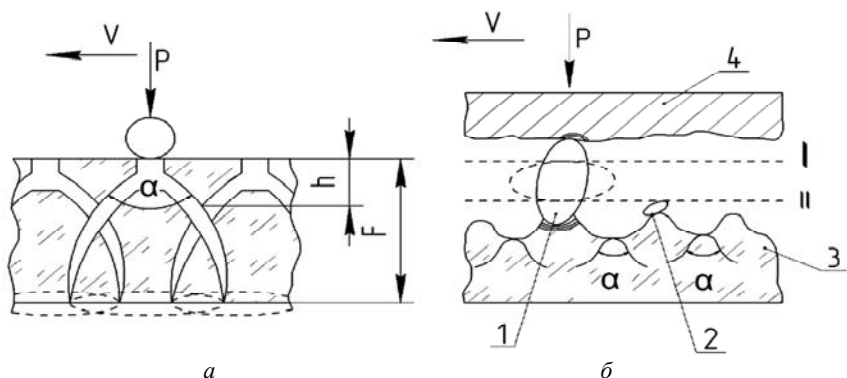


Рис. 3.1. Модель процесса обработки стекла неподвижным стальным шариком (*а*) и подвижным абразивным зерном (*б*):

1 – крупное абразивное зерно; 2 – мелкое зерно;  
3 – поверхность стекла; 4 – шлифовальный

Трещины пересекаются между собой и отделяют частицы стекла от основной массы, в результате чего на поверхности образца образуется *рельефный (матовый)* слой. При этом  $h = F / 3$ .

В процессе обработки увлажненные абразивные зерна *1* располагаются между поверхностями стекла *3* и шлифовальника *4* (рис. 3.1, *б*), которые перемещаются относительно друг друга с определенной относительной скоростью  $V$  и под некоторым давлением  $p$ . В результате трения абразивные зерна перекатываются между инструментом и деталью, воздействуя на них и друг на друга. При этом происходит срабатывание стекла, износ шлифовальника и разрушение самих зерен. Так как размеры зерен неодинаковы, то шлифовальник

оказывает давление только на самые крупные зерна (например, зерно 1 на рис. 3.1, б). Во время движения шлифовальника и стекла зерна поворачиваются и шлифовальник ударяет по другим, менее крупным зернам (например, зерно 2 на рис. 3.1, б, положение II), или же по повернутым зернам в месте их наибольшего сечения (например, зерна 1, положение I), благодаря чему действие шлифовальника носит *ударно-вибрационный* характер. При повторных ударах зерен по стеклу начинают отделяться его кусочки и образуется шлифованная поверхность.

Установлено, что угол  $\alpha$  при вершине бугорков и впадин шлифованной поверхности стекла (см. рис. 3.1) определяется химическим составом последнего и не зависит от размеров зерен абразивов. Так, например, для кварцевого стекла  $\alpha = 109^\circ$ , а для стекол марок ТФЗ и К8 – соответственно  $103$  и  $150^\circ$ . Поэтому скорость шлифования пропорциональна увеличению угла  $\alpha$ , поскольку увеличивается вероятность пересечения трещин.

### **3.2. Влияние основных технологических факторов на процесс шлифования**

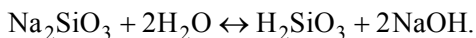
#### ***3.2.1. Действие жидкости***

Действие жидкости на процесс шлифования может быть физическим, химическим и физико-химическим.

К *физическому* воздействию жидкости относятся:

- 1) распределение абразивных зерен по поверхности деталей и инструмента;
- 2) вымывание и удаление разрушенных кусочков стекла и абразивных зерен;
- 3) смазывание поверхностей деталей и инструмента, уменьшающее трение и способствующее более длительному сохранению механических свойств абразивных зерен;
- 4) отведение тепла, развивающегося при обработке;
- 5) смягчение ударно-вибрационного действия шлифовальника.

*Химическое влияние жидкости.* Ускоряющее действие воды объясняется гидролитическим разложением поверхностного слоя стекла, которое протекает по формуле:





При испарении влаги имеем:



Следовательно, вода, проникая в трещины стекла, вступает в химическое взаимодействие с последней, в результате чего в трещинах образуется  $\text{SiO}_2$ . Обладая большим объемом, чем стекло,  $\text{SiO}_2$  расклинивает трещины в стекле, ускоряя его разрушение.

К *физико-химическим* влияниям жидкости относится взаимодействие молекул смачивающей жидкости и поверхности стекла. Известно, что жидкость, попадающая в микротрещины твердого тела, способствует его разрушению, если она обладает высокой энергией смачивания данного тела.

Для большинства стекол вода является поверхностно-активной жидкостью и производит значительное расклинивающее действие на стекло при его шлифовании. Для кварцевого стекла аналогичное действие вызывает скипидар.

Из рассмотренных факторов действие первого является основным.

### ***3.2.2. Природа, величина и количество абразивных зерен***

Важным свойством абразивного зерна является его устойчивость к разрушению. Более устойчивое зерно может передавать более высокое давление, и его действие на поверхность стекла будет эффективнее.

Установлено, что съем стекла в процессе шлифования увеличивается с ростом величины шлифующих зерен. Эта зависимость является линейной в диапазоне 3–200 мкм. При работе с более крупными зернами увеличение шлифования замедляется, поскольку вероятность попадания абразивных частиц размером 200 мкм и более между стеклом и инструментом уменьшается. Увеличение эффективности шлифования большими зернами связано с тем, что такие частицы являются более прочными и могут передавать на стекло повышенное давление, в результате чего возникает более глубокий поврежденный слой в обрабатываемом материале.

Максимальный съем стекла в единицу времени обеспечивается при оптимальном расходе абразива определенной крупности. Расход ниже оптимального приводит к снижению производительности,

а увеличение расхода выше оптимального производительность не повышает, так как избыточные зерна в обработке не участвуют. Однако в настоящее время считают целесообразным работать при расходе суспензии выше оптимального (неограниченном). В этом случае измельченные зерна быстрее заменяются новыми и всегда есть уверенность, что оптимальный расход обеспечен.

Экспериментально установлено, что при недостатке и избытке жидкой фазы абразивные зерна царапают поверхность стекла. При избытке воды количество абразивных зерен уменьшается, а давление на каждое из них возрастает. Вследствие этого зерна перестают свободно перемещаться (кантоваться) по поверхности стекла и, как бы заклиниваясь, царапают его. При недостатке воды обилие зерен также затрудняет их перекачивание.

### *3.2.3. Материал шлифовальника и скорость его вращения*

Материал шлифовальника существенно влияет на процесс шлифования. Чем тверже материал, тем медленнее он истирается, сохраняя заданную кривизну поверхности, тем сильнее его ударно-вибрационное действие на абразивные зерна и, следовательно, тем сильнее разрушение стекол. Поэтому для обдирки выгодно изготавливать шлифовальники из стали или чугуна. Для мелкого шлифования, когда требуется уменьшить глубину разрушаемой поверхности перед полированием, целесообразно применять латунь, которая менее тверда, чем чугун, что очень важно для подгонки поверхности шлифовальника.

При обработке стекла пластмассовым шлифовальником глубина разрушения стекла еще более уменьшается в сравнении с латунным инструментом. Кроме того, при использовании пластмассовых шлифовальников на стекле почти не возникает царапин, что имеет место при шлифовании металлическим инструментом. Поэтому для ускорения полирования пластмассовые шлифовальники целесообразно применять на стадии окончательного мелкого шлифования. Однако производительность шлифования пластмассовым шлифовальником значительно ниже, чем металлическим.

При движении шлифовальника и стекла возникают ударно-вибрационные усилия, в сотни раз большие, чем при статическом давлении. Поэтому разрушение стекла пропорционально скорости.

Однако при чрезмерном увеличении скорости абразивные зерна под влиянием центробежной силы сбрасываются со шлифовальника, не успевая воздействовать на стекло.

Для обдирочных работ линейная скорость, отнесенная к краю шлифовальника, может достигать 15–20 м/с. Для мелкого шлифования скорость значительно меньше и составляет 1–3 м/с.

### 3.3. Обработка стекла связанным шлифующим абразивом

В настоящее время на всех стадиях шлифования стекла широко применяются инструменты с закрепленным абразивом, в качестве которого используется синтетический алмазный порошок. В теле инструмента этот порошок закрепляется различными органическими и металлическими связками (бутакриловая смола, сплав меди и железа и др.).

Процессы обработки закрепленным и свободным абразивами отличаются между собой. Сравнивая схемы действия сил на зерна (рис. 3.2), можно видеть, что в закрепленном зерне (рис. 3.2, а) при действии на него рабочего усилия  $P$  и относительном движении инструмента и заготовки возникают силы сжатия  $F_{сж}$ , изгиба  $F_{изг}$  и среза  $F_{ср}$ , в то время как свободное зерно (рис. 3.2, б) испытывает только силы сжатия и трения.

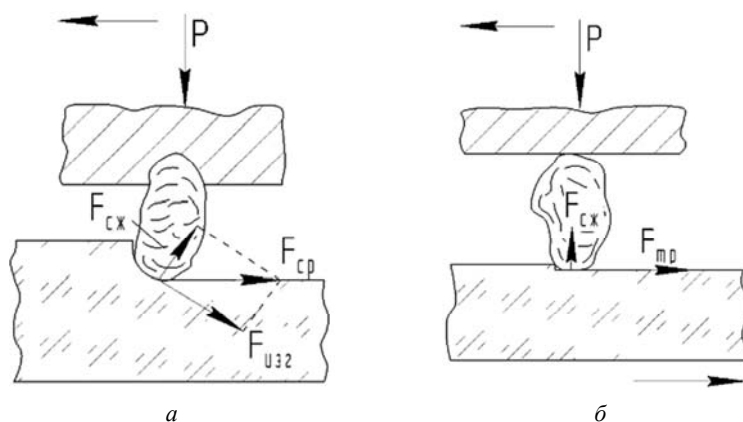


Рис. 3.2. Схема действия сил на закрепленное (а) и свободное (б) абразивные зерна в процессе обработки стекла

Сила сжатия во втором случае задерживает зерно, сообщая ему способность производить работу аналогично закрепленным зернам, т. е. царапанием (зерно скользит). При этом взаимодействие сил трения сообщает зерну вращательный момент, заставляя его перекатываться между поверхностями инструмента и стекла и производить ударно-вибрационное действие (зерно движется качением). Так как закрепленное зерно совершает только движение скольжения, то при одинаковом  $P$ , действующим на инструмент, давление на закрепленное зерно больше, чем на свободное (нет потери энергии на перекатывание зерна), и сьем стекла выше.

Помимо ударно-вибрационного действия взаимные столкновения зерен в процессе обработки стекла свободным абразивом приводят к их ускоренному разрушению. Так как глубина поврежденного слоя стекла пропорциональна размерам зерен, то процесс уменьшения размеров зерна приводит к понижению съема стекла и увеличению расхода абразива.

Закрепленные зерна с течением времени затупляются, усилие резания увеличивается, и они выкрашиваются из связки, но не раскалываются. Вместо них в работу вступают новые зерна, и процесс шлифования идет с равномерной интенсивностью.

Характерно также, что закрепленный абразив вызывает не разрозненные точечные выколки, а сплошные царапины, т. е. работает как резец.

### **3.4. Сущность процесса полирования стекла**

При полировании решают две основные задачи:

- 1) удаление следов шлифования до получения прозрачной поверхности с заданной степенью чистоты;
- 2) доведение кривизны поверхности по общим  $N$  и местным  $\Delta N$  ошибкам согласно техническим условиям на деталь.

В процессе полирования с поверхности стекла удаляется слой в несколько микрометров, значительно меньший, чем при шлифовании. Однако время, необходимое для получения требуемой полированной поверхности, в несколько раз больше, чем затрачиваемое на все операции шлифования.

Процесс полирования проходит при помещении увлажненного жидкостью полировального порошка между поверхностями стекла и подложкой полировальника.

Полирование стекла основано на совместном действии *механических, химических и физико-химических* факторов, причем скорость полирования стекла различных марок зависит от их *химической стойкости*, поэтому менее химически стойкие стекла полируются быстрее, чем более стойкие, независимо от их механической твердости. Скорость полирования стекла в присутствии воды значительно больше, чем в неводных средах, что можно объяснить гидrolитическим разложением стекла водой и образованием поверхностной пленки менее прочной, чем стекло.

С увеличением температуры полируемой поверхности стекла происходит ускорение химических реакций, протекающих на поверхности стекла, и тем самым значительно увеличивается производительность полирования. Понижение температуры приводит к обратному результату.

Зерна полирита, хорошо адсорбируясь поверхностями подложки полировальника и стекла, при взаимном их перемещении срывают участки поверхностной пленки, толщина которой и определяет предельную точность полирования ( $1/200\lambda$ ).

Между поверхностями стекла и подложки полировальника имеется несжимаемый аномальный слой жидкости, толщина которого зависит от давления на инструмент.

Полировальные зерна производят на стекле разрушения в виде микробороздок, направленных по движению зерен. Это свидетельствует о том, что при полировании происходит не хрупкое разрушение поверхности с образованием трещин (как при шлифовании), а удаление микростружки, и полировальные зерна при работе закрепляются на подложке полировальника, а не кантуются, как при шлифовании.

Скорость полирования существенно изменяется в зависимости от степени смачиваемости суспензий полировальных зерен и подложки. Чем меньше смачиваемость, тем лучше зерна закрепляются на подложке и тем интенсивнее идет полирование. Уменьшение смачиваемости полировальных порошков может быть достигнуто обработкой их растворами олеиновой кислоты.

### **3.5. Влияние основных технологических факторов на производительность процесса полирования**

#### ***3.5.1. Природа подложки полировальника***

Для равномерного давления на полировальные зерна с практически различными размерами материал полировальника должен обладать упругими свойствами. Для обеспечения высокой точности полируемой поверхности поверхность инструмента должна длительное время сохранять свою форму. Для обеспечения эффективного полирования, т. е. быстрого получения чистой прозрачной поверхности образца, материал инструмента должен позволять хорошо закрепляться зернам полировального порошка на его поверхности. Для точной регулировки кривизны поверхности детали по общим и местным ошибкам необходимо легко и с большой чувствительностью корректировать кривизну поверхности инструмента.

Полировальники, изготовленные из металлов, плохо удовлетворяют указанным требованиям. Поэтому для полирования стекла используются неметаллические подложки, закрепляемые на приспособлении – полировальном инструменте. В качестве подложек применяют волокнистые материалы и композиции различных смол.

К волокнистым материалам относятся: войлок толщиной до 14 мм, фетр толщиной от 2,5 до 5 мм, мягкая кирза толщиной до 2 мм. Плотные материалы (например, фетр) обеспечивают лучшее качество поверхности, чем менее плотные (войлок).

Поверхность стекла, отполированная «суконными» (волокнистыми) полировальниками, получается слегка волнистой. Кроме того, такие полировальники не позволяют корректировать кривизну их поверхности, что необходимо для обеспечения высокой точности обрабатываемой детали.

Глубина микронеровностей поверхности, оставшихся после полирования, находится в пределах 0,06–0,12 мкм и не видна невооруженным глазом. Поэтому «суконные» полировальники можно рекомендовать для обработки некоторых точных, например склеиваемых, поверхностей деталей визуальных систем, поверхностей коллективов, глазных линз и окуляров.

Важным свойством смоляной подложки является ее вязкость, которая позволяет полировальнику легко изменять свою форму

и приобретать поверхность заданной кривизны как при его изготовлении, так и в процессе полирования деталей.

Вязкость подложки зависит от температуры смолы. Последняя, в свою очередь, изменяется в зависимости от температуры окружающего воздуха. Существует оптимальная вязкость смолы, при которой полирование стекла протекает наиболее интенсивно. В этом случае полировальные зерна наиболее выгодно закрепляются на поверхности подложки, а сама подложка наилучшим образом приспособляется к поверхности стекла и сохраняет приданную ей форму. Для обеспечения этого необходимо, чтобы предел текучести смолы не превышал напряжений сдвига.

При вязкости выше или ниже оптимальной производительность полирования падает. С увеличением вязкости полировальные зерна хуже закрепляются на поверхности подложки и быстрее смываются с нее. При пониженной вязкости зерна углубляются в смолу и плохо выполняют свою функцию. Кроме того, в этом случае смола растекается и изменяется кривизна поверхности полировальника. При полировании с помощью «твердой» смолы чистота обрабатываемой детали может быть несколько хуже, так как зерна полирита иногда царапают поверхность стекла.

Смоляные подложки позволяют легко корректировать величину их рабочей (эффективной) поверхности в различных участках путем подрезки. Эта операция заключается в нанесении на поверхности подложки канавок-резов каким-либо режущим инструментом.

Широкие возможности «управления» поверхностью смоляной подложки в процессе обработки образца позволяют вести полирование с высокой степенью точности.

Существенным недостатком смоляных подложек является значительное изменение их вязкости с изменением температуры окружающей среды и в зоне обработки, что затрудняет ведение полирования при интенсивных режимах. Этого недостатка лишены пенополиуретановые (пластмассовые) полировальники, однако их невозможно подрезать, т. е. гибко изменять величину эффективной рабочей поверхности.

### ***3.5.2. Температура поверхности стекла и окружающей среды***

Установлено, что при изменении температуры воздуха от 5 до 20 °С производительность полирования увеличивается почти в два

раза, после чего рост интенсивности процесса замедляется, а при температуре 50–60 °С практически не возрастает. Принято считать, что оптимальная для полирования температура окружающей среды должна находиться в пределах 22–26 °С.

При полировании следует учитывать также влияние температуры поверхностей полировальника и обрабатываемой детали на термические деформации последней при ограниченном и неограниченном расходе суспензии. При ограниченном расходе суспензии температурные деформации деталей небольших размеров незначительны. При больших размерах деталей эти деформации могут существенно влиять на точность детали. При неограниченном расходе суспензии термические деформации поверхности детали уменьшаются.



## Глава 4. ТРЕБОВАНИЯ К ОПТИЧЕСКИМ ДЕТАЛЯМ И МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

### 4.1. Чертежи оптических деталей

Чертеж полностью характеризует оптическую деталь и служит исходным документом для разработки технологического процесса ее изготовления и контроля.

Детали располагают на чертежах по ходу луча света, идущего слева направо. Асферические поверхности определяют уравнением кривой профиля поверхности вращения. Цилиндрическую поверхность задают значением ее радиуса  $R$ , перед которым пишут «Цилиндр».

В правом верхнем углу чертежа располагают таблицу, в которой указывают требования к материалу, к детали и расчетные данные. Если деталь изготовлена из оптического бесцветного стекла, то в требованиях к материалу указывают допустимые отклонения показателя преломления  $\Delta n_v$  и средней дисперсии  $\Delta(n_F - n_C)$ , оптическую однородность, двойное лучепреломление, светопоглощение, бессвильность, пузырность. При изготовлении деталей из цветных стекол вместо значений  $\Delta n_v$  и  $\Delta(n_F - n_C)$  приводят цветовые данные стекла. В частности, указывают границы пропускания по спектру  $\lambda_{пр}$  и наибольшее значение коэффициента поглощения  $E_{\lambda_0}$ .

Требования к деталям подразделяются на общие и характерные для деталей определенного типа. К общим требованиям относится класс чистоты  $P$  полированных поверхностей, указывающий число и размеры допускаемых дефектов на этих поверхностях (точек, царапин, выколов, ласин и др.) и отступление их от заданной кривизны ( $N$  и  $\Delta N$  – общая и местная ошибки).

Помимо указанного, для линз в таблице приводят допустимую величину несовпадения геометрической и оптической осей линзы, называемую децентрировкой ( $C$ ), а также класс точности пробного стекла  $\Delta R$ .

Для призм приводят допустимые отклонения пирамидальности  $\pi$ , разности углов  $\delta_{45^\circ}$  и разрешающей способности  $\varepsilon$ , а для плоскопараллельных пластин – клин  $\theta$  и допустимое фокусное расстояние  $f'_{\min}$ .

Из расчетных данных приводят значения световых диаметров, длину хода  $l$  луча в призме, а также фокусное расстояние и фокальные отрезки для линзы.

В поле чертежа и примечаниях указывают дополнительные конструктивные особенности и технологические требования, например требования к гравировке штрихов и знаков, обозначение покрытия с указанием его шифра и т. п.

В основной надписи приводят наименование детали, марку стекла и ГОСТ, массу детали, масштаб чертежа. Для сборочных единиц таблица не приводится.

## 4.2. Показатели качества деталей

Отклонение кривизны полированной поверхности от заданной определяют интерференционным методом путем сравнения с эталоном. Если наложить на контролируемую поверхность детали  $1$  (рис. 4.1, *а*) точно изготовленную поверхность эталона  $2$  (пробное стекло) и осветить их, то при наличии незначительного воздушного зазора между поверхностями будут видны интерференционные кольца (см. рис. 4.1, *а*) или полосы (рис. 4.1, *б*).

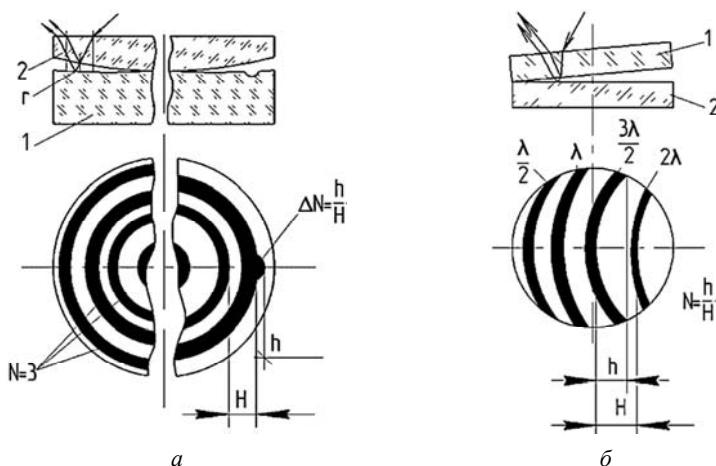


Рис. 4.1. Оценка точности детали по интерференционной картине в виде колец (*а*) или полос (*б*):

$1$  – контролируемая поверхность детали;  $2$  – пробное стекло

Известно, что условие минимума интерференционной картины

$$\Delta m = 2t + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1) \frac{\lambda}{2},$$

где  $m = 0, 1, 2, \dots$ ;

$t$  – толщина воздушного зазора между соприкасающимися поверхностями.

При  $m = 1$  получим

$$\Delta = 2t + \frac{\lambda}{2} = \frac{3}{2}\lambda,$$

откуда  $t = \lambda / 2$ . При  $\lambda = 555$  нм получим, что величина воздушного зазора, соответствующая одному кольцу, приблизительно равна 250 нм (0,25 мкм).

Интерференционную картину называют «цветом», так как при освещении белым светом линии имеют радужную окраску.

Сосчитав число колец по какому-либо цвету спектра, определяют величину отступления поверхности детали от поверхности пробного стекла. Отклонение от заданной поверхности называют величиной общей ошибки и выражают числом интерференционных колец или полос  $N$ . При данном методе контроля определяется не отклонение от самого радиуса кривизны, а только отступление от стрелки прогиба поверхности пробного стекла.

В некоторых случаях  $N$  указывают со знаками «плюс» или «минус». Это значит, что в первом случае имеется касание пробного стекла и детали в центре (зазор на краю), во втором – касание на краю (зазор в центре). В производственном обиходе отклонения первого случая называют «бугром» (крупный или широкий цвет), второго – общей «ямой» (узкий или мелкий цвет).

Для определения знака  $N$  используют следующий способ: если при нажатии в центре пробного стекла диаметр колец увеличится, то имеет место «бугор», и наоборот.

Если величина зазора между поверхностями детали и пробного стекла будет менее 250 нм, то общая ошибка поверхности должна быть меньше одного кольца. В этом случае при оценке ошибки поверхности будет виден не полный спектр цветов, соответствующий

одному кольцу, а лишь некоторое число цветов (соломенный, ста-листый цвета), что затрудняет оценку точности обработки детали. В таких случаях поступают следующим образом. На испытываемую деталь 2 накладывают пробное стекло 1 и последнее прижимают к краю детали, создавая воздушный клин (см. рис. 4.1, б). При этом интерференционная картина будет представлять собой ряд искривленных полос постоянной ширины  $H$ . Величина ошибки поверхности  $N$  характеризуется кривизной полос и определяется стрелкой их прогиба  $h$ , выражаемой в долях ширины полосы, т. е.  $N = h / H$ .

Если кривизна поверхности детали изменяется плавно, то интерференционная картина имеет вид правильных кругов или полос (рис. 4.1, а, б). Однако на контролируемой поверхности часто имеются и отдельные местные неровности (рис. 4.1, а, правая сторона). В этом случае кольца или полосы искривляются. Отступление колец (полос) от правильной формы определяет величину местных неровностей поверхности (местных ошибок). Их величина выражается в долях ширины полосы и обозначается  $\Delta N$  ( $\Delta N = h / H$ ).

Если на интерференционной картине кольца вытянуты в одном и сжаты в другом направлении (рис. 4.2) или изогнутые полосы не составляют часть окружности, то имеется общее отклонение формы поверхности от сферической, которое называют астигматичностью поверхности и определяют как разность числа колец  $N$  по осям  $AB$  и  $CD$ . Геометрически астигматичность означает, что оптическая поверхность стала сфероцилиндрической.

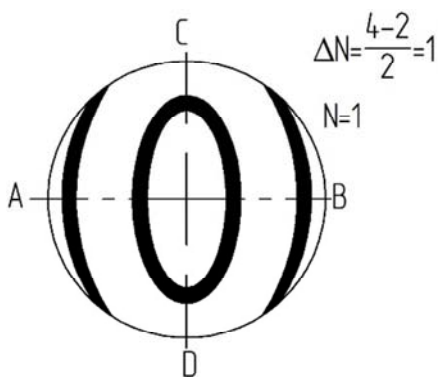


Рис. 4.2. Определение величины локальной погрешности

Если диаметр детали  $D_d$  больше диаметра пробного стекла  $D_{пр. ст.}$ , то для поверхности детали справедлива формула пересчета числа колец:

$$N_d = (D_d / D_{пр. ст.})^2 N_{пр. ст.}$$

Местные ошибки формы оптических поверхностей уменьшают предел разрешения  $\epsilon$  оптической системы, который не компенсируется размерами толщин и радиусов линз, а также воздушных промежутков. Поэтому требования к допустимым значениям  $\Delta N$  строже, чем к  $N$ . Все полированные поверхности оптических деталей имеют шероховатость 14-го класса, обозначаемого  $Rz$  0,05. Требования к чистоте этих поверхностей регламентированы двенадцатью классами чистоты  $P$ : 1-10, 1-20, 1-40, I, II, ..., IX. Первые три используются для деталей, расположенных в плоскости промежуточного изображения предмета (шкалы, сетки, лимбы), а остальные – для деталей, удаленных от плоскости изображения.

Децентричность  $C$  линзы выражается в миллиметрах и вызывает появление aberrаций комы, астигматизма и хроматизма.

Пирамидальность  $\pi$  призмы выражается в угловой мере и представляет собой непараллельность ребер призмы или непараллельность ребра одного из углов к наружным исполнительным граням. Пирамидальность призмы уменьшает ее разрешающую способность.

Разность углов  $\delta_{45^\circ}$  призмы также выражается в угловой мере. Если  $\delta_{45^\circ} \neq 0$ , то развертка призмы представляет собой не плоскопараллельную пластинку, а клин, который отклоняет лучи от расчетных направлений и вносит хроматизм.

Отклонение значения угла крыши призмы от  $90^\circ$  вызывает двойные изображения, что снижает разрешающую способность.

Значения фокусного расстояния и фокальных отрезков указаны по данным расчета оптической системы прибора и служат для составления таблиц комплектации линз и проверки оптических параметров деталей.

### 4.3. Виды операций обработки стекла

В технологии изготовления оптических деталей можно выделить три группы операций обработки стекла: основные, специальные и вспомогательные.

Основные операции сопровождаются удалением с обрабатываемой поверхности заготовки слоев стекла различной толщины, а также изменением формы заготовки, ее размеров и качества поверхности. Такими операциями являются резание, сверление, фрезерование, шлифование, полирование.

Специальные операции изменяют свойства полированных поверхностей. Сюда относятся:

- соединение деталей в блоки склеиванием, силами молекулярного сцепления (оптическим контактом) и спеканием (ГОК);
- нанесение на поверхность деталей различных покрытий, а также шкал и сеток.

Вспомогательные операции проводят для выполнения основных и специальных операций обработки. К таким операциям относят:

- блокировку (крепление заготовок деталей на приспособления);
- разблокировку (снятие деталей с приспособления);
- промывку деталей и приспособления;
- нанесение на обработанные поверхности защитных покрытий.

## Глава 5. БЛОКИРОВКА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

### 5.1. Требования к блокировке оптических деталей и к наклеечным веществам

Соединение заготовок оптических деталей для совместной их обработки называют *блокировкой*. Сочетание приспособления и закрепленных на нем деталей называют *блоком*.

Способы блокировки оптических деталей должны обеспечивать ряд требований:

1) возможность контроля размеров деталей в процессе их обработки;

2) прочность соединения;

3) минимальную деформацию деталей;

4) простоту и быстроту блокировки и разблокировки.

Оптические детали блокируют следующими методами:

1) сжатием в приспособлениях;

2) приклеиванием;

3) соединением при помощи «оптического контакта»;

4) под влиянием собственного веса в сепараторах.

При изготовлении линз с большой кривизной поверхностей и крупногабаритных линз применяют блоки с одной деталью (штучное крепление).

Наклеечные вещества должны быть химически нейтральными к полированным поверхностям оптических деталей и хорошо удаляться с них путем растворения в соответствующих жидкостях. Эти вещества должны иметь темный цвет, на фоне которого легко обнаруживать различные дефекты полированной поверхности.

Важнейшие свойства наклеечных веществ – вязкость, адгезия (прилипаемость), размягчение при определенной температуре, коэффициент объемного теплового расширения, растворимость.

Вязкость является основным свойством наклеечных веществ. Она изменяется от температуры смолы, которая зависит от температуры окружающего воздуха и температуры обрабатываемой детали. Чем выше температура, тем меньше вязкость. Поэтому при интенсивных режимах обработки для блокировки следует применять более вязкую смолу, так как в противном случае приклеенная к приспособлению деталь может сдвинуться с места, и обработка будет

неправильной. Требуемую вязкость смол достигают путем подбора их составляющих компонентов.

Коэффициент объемного температурного расширения смол влияет на их способность деформировать поверхность деталей, т. к. для смол он значительно выше, чем для стекол. Поэтому стекла изменяют свой объем при нагреве или охлаждении значительно меньше, чем смола, и, будучи скреплены с ней, деформируются. Например, при охлаждении смолы, нагретой при склейке, происходит уменьшение ее объема (усадка), благодаря чему деталь 1 (рис. 5.1, а) стягивается смолой 2, в результате чего обрабатываемая поверхность 3 детали 1 изогнется (рис. 5.1, б).

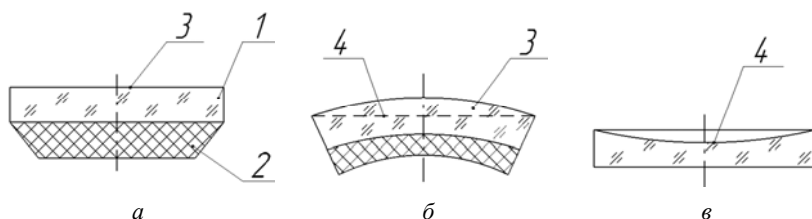


Рис. 5.1. Деформация детали при эластичной блокировке (а), вызванная усадкой смолы (б), и погрешность формы детали (в):  
1 – деталь; 2 – смола; 3 – поверхность детали; 4 – кривизна поверхности

В процессе обработки детали деформированная поверхность 3 приобретает правильную кривизну, например, 4 (см. рис. 5.1, б, пунктирная линия). Однако, когда клей будет удален, деталь вследствие упругих деформаций выравняется, и обработанная поверхность 4 станет неправильной (рис. 5.1, в).

Установлено, что наименьшие деформации поверхностей вызывает каменноугольный пек, наибольшие – парафин. Также на величину деформаций влияют толщина слоя смолы и тепловые свойства материала приспособления. Наибольшие деформации возникают при блокировке на приспособления из дюралюминия, а наименьшие – при наклейке на приспособления из стекла, имеющего низкий коэффициент расширения.

С ростом толщины слоя смолы увеличивается деформация, поэтому для ее уменьшения целесообразно применять тонкие слои. Для уменьшения деформации деталей смолой следует медленно охлаждать блоки после приклеивания заготовок к приспособлениям.



## 5.2. Блокировка заготовок при предварительной обработке (склеивание столбиков)

Соотношение между шириной и диаметром столбика и его длиной принимают в пределах 1:4–1:10. Перед склеиванием заготовки промывают водой, протирают насухо и нагревают. Нагрев должен быть равномерным. Его считают законченным, если клей при соприкосновении с нагретой заготовкой начинает плавиться. Для склеивания применяют наклейные воски.

Заготовки, смазанные тонким слоем клея, накладывают друг на друга, получая столбик. Чтобы он имел правильную форму (цилиндра или призмы), столбик в нагретом состоянии устанавливают в различные приспособления (угольники) и сжимают, вытесняя избыток клея. Недопустимо опускать столбик в холодную воду, так как при этом он расклеивается.

## 5.3. Способ эластичной блокировки линз

Заготовки на приспособлении крепят путем приклеивания их смолой средней твердости слоем значительной толщины. Такое основание для деталей обладает эластичными свойствами. Толщина слоя смолы для выпуклых линз по оси и для вогнутых по краю составляет примерно 0,1–0,2 от диаметра линзы. Смолу на детали наносят в виде подушек-плашек.

Для крепления плоскопараллельных пластин применяют планшайбы, для линз – грибы и чашки, для призм – планшайбы с пазами.

Марку наклейной смолы обозначают буквой Н (наклейная) и цифрой, выражающей логарифм вязкости смолы. Марку смолы выбирают в зависимости от режима обработки (скорость, давление) и температуры воздуха на участке. Чем интенсивнее режим обработки и выше температура воздуха, тем больше канифоли должно быть в смоле.

Чтобы обрабатываемая поверхность блока имела правильную сферу (или плоскость), блокируемые заготовки 1 притираются к поверхности притирочного приспособления 2 (рис. 5.2). Количество линз на поверхности приспособления определяют расчетом.

Для очистки блока от остатков абразива между линзами оставляют зазор  $b \cong 0,05D_{л}$ .

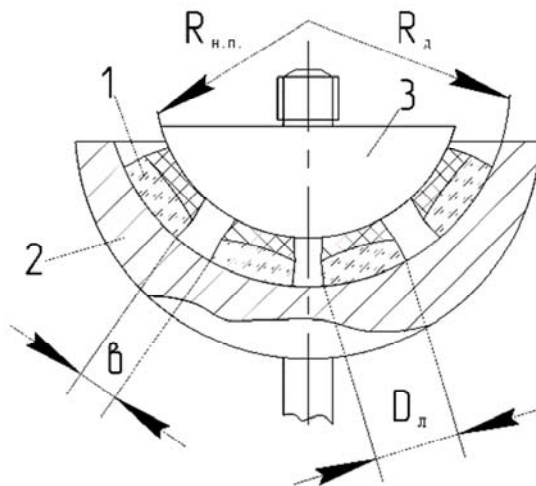


Рис. 5.2. Эластичное крепление линз:  
 1 – заготовка; 2 – притир; 3 – наклеечное приспособление

На смоляные подушки притертых линз накладывают наклеечное приспособление 3, нагретое до температуры 80–100 °С; подушки размягчают и приклеивают к приспособлению. После этого блок охлаждают на воздухе или в воде 2.

Так как смола при затвердении деформируется, рекомендуется начать обработку сразу же после блокировки, фиксируя тем самым правильное положение деталей, достигнутое в процессе притирки.

Достоинством эластичной блокировки являются простота и универсальность наклеечных приспособлений. Из рис. 5.2 видно, что при одних и тех же радиусах кривизны  $R_d$  и  $R_{н.п.}$  обрабатываемой поверхности деталей и наклеечного приспособления диаметры и толщины линз, а также радиус кривизны второй поверхности деталей могут различаться. Метод блокировки позволяет обрабатывать линзы с точностью до одного кольца и с допуском на толщину до 0,01 мм. Однако обработка тонких линз (особенно – отрицательных менисков) с высокой точностью затруднительна, так как большие смоляные массы подушек деформируют поверхности обрабатываемых деталей, что понижает точность обработки. Уменьшения деформирующего действия смолы можно достигнуть, помещая между подушкой и линзой бумажную прокладку диаметром  $(1/2-1/3)D_d$ .

Обильная подача на блок абразивной суспензии в процессе обработки также снижает деформацию поверхностей деталей и уменьшает размягчение смолы.

Применять эластичный метод блокировки можно только после того, как грубое шлифование (обдирка) заготовок закончено, либо вручную поштучно, либо другим способами, что усложняет технологический процесс.

При эластичной блокировке толщину линз проверяют по контрольным лункам *A* (рис. 5.3), имеющимся на некоторых из них в центре и на краях блоков. Обработку ведут до тех пор, пока поверхность *CD* не коснется дна лунки.

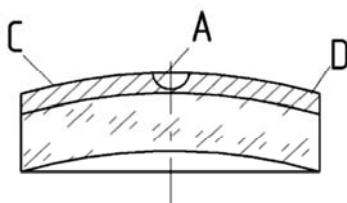


Рис. 5.3. Контроль толщины линзы по контрольным лункам

#### 5.4. Способ жесткой блокировки линз

Крепление линз *1* жестким способом производится приклеиванием заготовок при помощи тонких смоляных прокладок (просмоленная марля или бязь толщиной 0,1–0,3 мм) на наклеечные приспособления, имеющие специальные посадочные места, форма и размеры которых определяются конфигурацией заготовок (рис. 5.4, *a*).

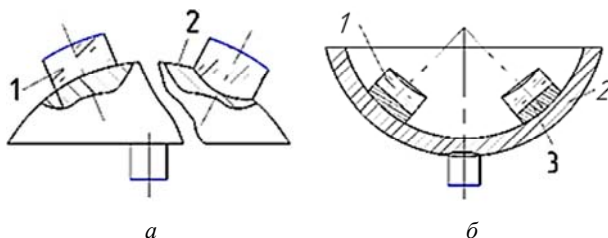


Рис. 5.4. Схема жесткой блокировки линз:  
*a* – с помощью смоляной прокладки; *б* – с помощью планшайбы;  
*1* – деталь; *2* – наклеечное приспособление; *3* – шайба

Тонкий наклеечный слой мало деформирует поверхности деталей и не позволяет им перекашиваться при размягчении.

При несоответствии кривизны поверхностей наклеечного приспособления 2 и приклеиваемой детали 1 на приспособлении закрепляют шайбы 3 (рис. 5.4, б).

Перед блокировкой наклеечные приспособления и заготовки нагревают на плите. Температура нагрева приспособления составляет 80–100 °С, а деталей – несколько ниже. Затем в лунку приспособления кладут пропитанную смолой прокладку, накладывают на нее линзу и с помощью деревянной палочки или специального пресса выжимают остатки смолы. После наклейки линз блоки остывают на воздухе, причем линзы дополнительно в процессе остывания подправляют палочкой.

Данный способ блокировки позволяет обрабатывать детали блоками при высокопроизводительных режимах, начиная обдиркой или фрезеровкой и заканчивая полированием.

К недостаткам способа следует отнести некоторую сложность и дороговизну наклеечных приспособлений, так как их можно применять только для деталей определенной формы и размеров, поэтому жесткий метод блокировки рационален лишь при массовом и крупносерийном производстве деталей, когда указанные недостатки метода компенсируются высокой производительностью обработки.

### 5.5. Блокировка высокоточных деталей

Для обеспечения высокой точности обработки ряда деталей, например линз, имеющих большую кривизну поверхностей с небольшой толщиной по оси, плоскопараллельных пластин с узким допуском на клиновидность и точных призм, необходимо максимально уменьшить деформации поверхностей деталей наклеечной смолой. Это достигается различными способами.

При полужестком методе блокировки тонких отрицательных менисков 1 (рис. 5.5, а) их склеивают сначала при помощи просмоленной матерчатой ткани 2 с промежуточной стальной прокладкой 3, которую, в свою очередь, смолой 4 приклеивают к приспособлению 5.

Для уменьшения площади соприкосновения смолы с деталью применяют кольца (полоски) из смолы 9 (рис. 5.5, з), приклеивающие

деталь за боковые поверхности, при этом под деталь помещают матерчатую прокладку 10.

Для обработки пластин с точностью поверхности в пределах  $N = 0,5-2$ , колец и при отношении толщины к диаметру порядка 1:8...1:10 применяют блокировку шариками с диаметром 6–8 мм, изготовленными из смолы с вязкостью  $\eta_{25} = 10-10,3$ .

Шарики 11 (рис. 5.5, д) в определенном порядке наносят на поверхность слегка прогретой детали 12. Притерев детали к притирочной планшайбе 13, на шарики накладывают наклеечную планшайбу 14, нагретую до 50–60 °С.

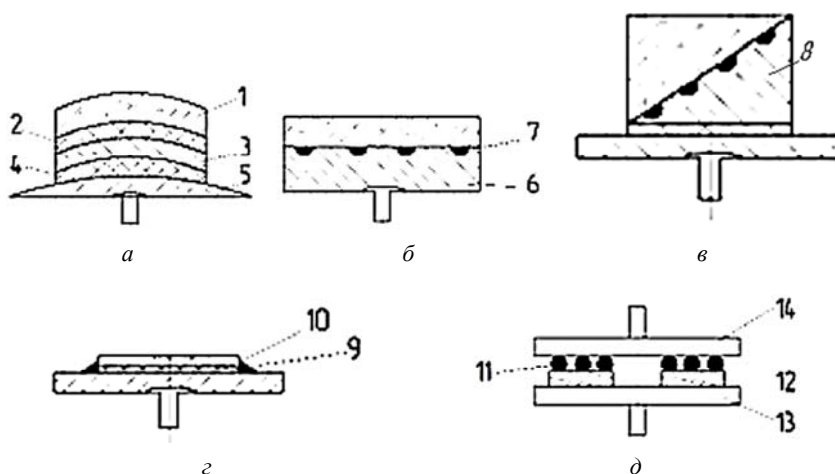


Рис. 5.5. Схемы крепления деталей высокой точности полужестким методом (а, б, в), с помощью смоляных колец (г) и с помощью смоляных шариков (д):

- 1 – деталь; 2 – просмоленная прокладка; 3 – стальная прокладка; 4 – смола; 5 – наклеечное приспособление; 6 – планшайба; 7 – канавки, заполненные смолой; 8 – приспособление для призм; 9 – смоляное кольцо; 10 – матерчатая прокладка; 11 – смоляные шарики; 12 – деталь; 13 – притир; 14 – планшайба наклеечная

## 5.6. Блокировка призм и пластин оптическим контактом

Способ крепления основан на силах молекулярного сцепления двух точно отполированных и чистых стеклянных поверхностей детали 1 (рис. 5.6, а) и контактного приспособления 2.

Перед блокировкой поверхности приспособления и детали тщательно очищают спиртом и для удаления пылинок обмахивают белой кисточкой. Деталь накладывают на приспособление, причем она должна плавно скользить (плавать) по поверхности контактного приспособления, что свидетельствует об отсутствии пылинок, а при наблюдении поверхности должна быть видна интерференционная картина. Для возникновения молекулярного сцепления между приспособлениями и деталью последнюю прижимают к приспособлению до исчезновения интерференционной картины. Наличие отдельных радужных окрасок в плоскости контакта свидетельствует о плохой чистоте соприкасающихся поверхностей. Чтобы между поверхностями детали и приспособления не попала вода (что снизило бы прочность блокировки), края детали и приспособления покрывают защитным лаком.

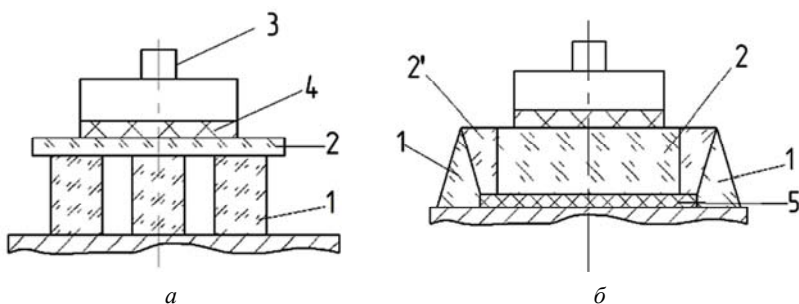


Рис. 5.6. Крепление деталей методом оптического контакта с помощью контактного приспособления (*а*) и с помощью контактного приспособления и переходных «сухарики» (*б*):

1 – деталь; 2 – приспособление контактное; 2' – «сухарики»;  
3 – планшайба; 4 – смола; 5 – папиросная бумага

Контактные приспособления для обработки призм должны обрабатываться с высокой точностью углов (порядка 1") и параллельности сторон. В случае необходимости иметь сложное контактное приспособление можно использовать переходный «сухарики» 2' (рис. 5.6, б). Так как контактное приспособление в процессе обработки деталей изнашивается, то необходимо, чтобы стекло, из которого оно изготовлено, обладало большой твердостью. Для обеспечения высокой точности обработки деталей нужно, чтобы стекло

приспособления имело минимальный коэффициент расширения. Планшайбу 3 к контактному приспособлению 2 приклеивают слоем смолы 4.

Для исключения срабатывания контактного приспособления 2 (рис. 5.6, б) и «сухарей» 2' в процессе обработки призм 1 при закреплении последних под контактное приспособление с «сухарином» подкладывают лист 5 из папиросной бумаги.

При контактном способе блокировки можно обрабатывать детали с точностью поверхности до  $N < 1$  кольца и углов – до 1". Однако на практике высокое качество поверхности на всех контактируемых деталях получить трудно вследствие местных ошибок поверхностей деталей и контактных пластин, разности коэффициентов расширения деталей и контактных пластин, их деформаций в процессе соединения, а также в результате нагрева от рук и механических усилий при обработке. Поэтому обработанные на оптическом контакте детали иногда доводят в сепараторном приспособлении.

Для снятия деталей с оптического контакта выполняют локальный нагрев (на открытом пламени) или охлаждение (с помощью эфира) детали или приспособления.

## **Глава 6. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АЛМАЗНЫЙ ИНСТРУМЕНТ**

### **6.1. Резание стекла**

Резание стекла производится при разделке листов толщиной до 15–20 мм. Операция резания состоит из образования трещины в стекле и раскалывания стекла по поверхности трещины. В качестве инструмента для резания стекла применяют алмазные резцы, ролики и резцы с твердосплавной пластинкой. Ввиду хрупкости алмаза им можно резать только полированные поверхности. Металлические ролики и резцы используют для резания шлифованного и полированного стекла.

Перед резанием стекло размечают с помощью линейки и карандаша (простого – для шлифованных поверхностей и воскового – для полированных). Иногда под лист стекла удобно подкладывать размеченный лист бумаги.

Ролик для резания стекла представляет собой диск диаметром 5–10 мм, изготовленный из закаленной стали или твердых сплавов (победита РЭЗ, ВК8 и др.). Режущий край ролика должен быть хорошо заточен под углом 50–60°.

Кристаллический алмаз с острыми гранями, предназначенный для резания стекла, заделывают либо в медную оправку, либо в сплав свинца с цинком так, чтобы режущая кромка выступала за поверхность сплава. При резании стекла алмаз необходимо держать перпендикулярно к плоскости пластины. Нельзя проводить дважды по одной и той же линии надреза. Также не допускается пересечения линий надреза и соскальзывания алмазного стеклореза с края стекла. Поверхность стекла должна быть чистой; жировые загрязнения не допускаются.

Резка листового стекла на круглые заготовки производится в приспособлении стеклорезом, которое перемещает его по окружности.

### **6.2. Раскалывание, распиливание и кругление стекла**

Надрезанное стекло раскалывают при помощи молотка или ломающего пресса. При раскалывании молотком по стеклу наносят



короткие и несильные удары вдоль всей линии надреза с противоположной стороны. При этом трещины проникают вглубь стекла.

Если же необходимо расколоть плоский кусок стекла значительной толщины, то удобно использовать пресс. При этом стекло укладывают на острую призму (клин) и раскалывают на части путем силового воздействия на пластину.

Для увеличения глубины трещины надрезанного стекла целесообразно увлажнить линию надреза.

Распиливание применяют для разделки кусков стекла значительной толщины в тех случаях, когда невозможно использовать пресс или необходимо получить заготовки сложной конфигурации.

Распиловку ведут при обильной подаче эмульсии или содового раствора. В качестве пил применяют металлические диски с закрепленным по периферии алмазонасным кольцом (слоем).

При круглении заготовке или группе заготовок, соединенных в столбик, придают цилиндрическую форму. Круглению подлежат заготовки светофильтров, защитных стекол, клиньев, круглых пластин и линз, когда их изготавливают не из прессовки. Операцию выполняют на круглошлифовальных станках, на обдирочных станках вручную и специальных станках для кругления. Чтобы избежать выколов, по краям столбика приклеивают дополнительные защитные стекла. В качестве СОЖ используют эмульсию. Контроль диаметра деталей после кругления производят скобами, штангенциркулями, микрометрами.

### **6.3. Сверление и высверливание стекла**

Операции сверления и высверливания применяют для получения отверстий в оптических деталях или круглых заготовок из листового стекла. В качестве инструмента используются сверла с закрепленным одиночным кристаллом алмаза, алмазные трубчатые сверла и металлические трубки.

Сверла из кристаллов алмаза используют для получения отверстий диаметром до 2 мм (рис. 6.1, *a*). Сверлят на сверлильных станках с применением ручной подачи. В качестве СОЖ используют машинное масло, керосин, скипидар. В процессе сверления сверло периодически поднимают над заготовкой, чтобы СОЖ проникла в зону обработки. На поверхности заготовки в местах «входа»

и «выхода» сверла появляются выколки. Чтобы их избежать, с двух сторон заготовки приклеивают пластинки из стекла или на заготовке оставляют дополнительный припуск на сошлифование после сверления.

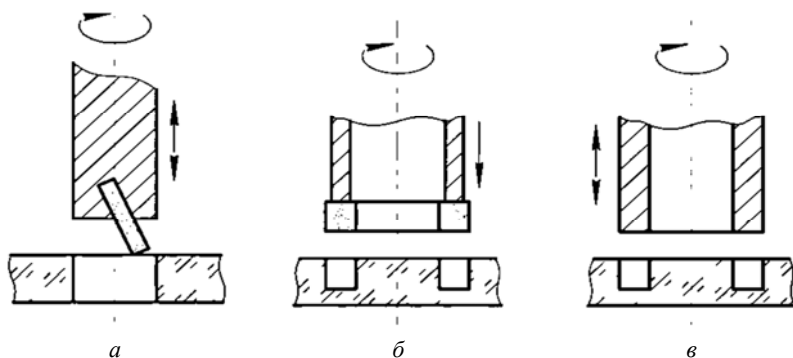


Рис. 6.1. Сверление стекла:  
а – сверло алмазное; б – сверло трубчатое; в – трубка металлическая

Алмазные трубчатые сверла (рис. 6.1, б) применяют для сверления отверстий и высверливания круглых заготовок диаметром от 2 до 200 мм. Металлические трубки (рис. 6.1, в) со свободным абразивом применяют для сверления отверстий и высверливания заготовок диаметром от 3 до 150 мм. Сверление производят на вертикально-сверлильных станках с ручной подачей и периодическим подъемом трубки над заготовкой. Абразивная суспензия подается в зону обработки вручную. Этот способ используется только в мелкосерийном производстве, так как процесс трудоемкий и не обеспечивает качества сверления.

#### 6.4. Алмазные абразивные круги

Алмазные круги состоят из корпуса (диска) и укрепленного на нем алмазосодержащего рабочего кольца (слоя), представляющего собой спеченную и спрессованную смесь зерен алмазного порошка со связкой. Основными характеристиками алмазосодержащего слоя являются:

1) марка алмаза (природный или синтетический, отличающиеся работоспособностью);

2) зернистость алмаза (определяет производительность и чистоту обработки: режущие свойства алмазно-абразивного инструмента улучшаются с увеличением размеров зерен, а чистота обработки повышается с уменьшением этих размеров);

3) связка (предназначена для закрепления зерен алмаза в инструменте; связки бывают металлические органические и керамические);

4) концентрация алмаза в связке.

Металлические связки для алмазного инструмента представляют собой порошкообразные металлы или их сплавы (различные композиции на основе меди, олова, алюминия, железа, никеля и других материалов), которые тщательно перемешивают с алмазным порошком, а затем прессуют и спекают. Алмазный инструмент на металлической связке обладает наиболее высокими прочностью и износостойкостью, которые могут регулироваться свойствами компонентов, входящих в связки. Металлические связки применяют при обработке твердых и хрупких материалов (в том числе стекла) и обозначают буквой М с цифровыми показателями (например, М1, М5, М10 и т. п.), которые характеризуют состав и свойства связки.

В качестве органических связок применяют бакелитовые (фенолформальдегидные) смолы различных марок. Для обработки оптических материалов на операциях, связанных с необходимостью интенсивного удаления больших припусков (на операциях шлифования), данный инструмент непригоден в силу низкой размерной стойкости, снижающей точность обработки и вызывающей повышенный расход алмаза. Эту связку применяют в основном для полирования оптических деталей, а иногда – и для их тонкого алмазного шлифования (ТАШ). Органические связки на основе бакелитов обозначаются буквой Б с дополнительным индексом (например, Б1, Б2, БК и т. п.), характеризующим содержание наполнителя в связке.

Керамические связки представляют собой глинистые и стеклообразные вещества. Керамические связки обозначают буквой К с индексом (например, К1, К2 и т. п.), характеризующим вид связки и ее состав. Для обработки оптических деталей алмазный инструмент на керамической связке из-за ее низкой износостойкости применяется редко.

Имеется также инструмент на металлических связках, который получают электрохимическим (электролитическим) методом. Закрепление алмазных зерен в данном случае не требует применения

дорогостоящих пресс-форм и позволяет изготавливать алмазно-абразивный инструмент сложного профиля.

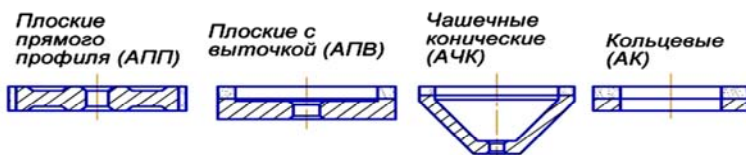
Важной характеристикой алмазного инструмента является концентрация алмаза, т. е. содержание алмаза в единице объема алмазоносного слоя. За 100 %-ю концентрацию условно принято содержание алмаза в количестве 4,4 карата в 1 см<sup>3</sup> алмазоносного слоя или 0,88 г/см<sup>3</sup> (1 кар. = 0,2 г). Приняв плотность алмазов равной 3,52 г/см<sup>3</sup>, определим объем, который занимают алмазы в 1 см<sup>3</sup>:

$$V = \frac{0,88}{3,52} = 0,25 \text{ см}^3.$$

Следовательно, при 100 %-й концентрации алмазные зерна в алмазоносном слое занимают 25 % по объему независимо от вида связки (органическая, керамическая, металлическая).

### 6.5. Типовые формы алмазного инструмента и его изготовление

Для обработки ОД наиболее часто используют алмазные круги, форма которых приведена на рис. 6.2.



ГОСТ 16167-80 ГОСТ 16170-81Е ГОСТ 16172-80Е ГОСТ 17006-80Е

Рис. 6.2. Типы алмазного инструмента

В зависимости от конкретных условий использования инструмента выбирают его форму и размеры, марку и зернистость алмазного порошка, вид связки и концентрацию алмаза.

Процесс изготовления алмазного инструмента состоит из следующих отдельных стадий:

- 1) изготовление пресс-формы для получения алмазоносного кольца;
- 2) изготовление корпуса инструмента;
- 3) изготовление алмазоносного кольца и соединение его с корпусом.

Изготовление пресс-форм и корпусов (металлических) для алмазного инструмента производят токарной обработкой. Изготовление алмазоносного слоя для всех видов связки выполняют прессованием с последующей термической обработкой. Соединение алмазоносного слоя с корпусом осуществляют, в основном, непосредственно в процессе его изготовления.

После подготовки навесок порошка алмаза и компонентов, входящих в состав связки, их смешивают с помощью керамических барабанных смесителей до получения однородной массы. Продолжительность смешивания может достигать до 48 ч. Смешивание порошков производят в увлажненном состоянии, так как при этом достигается лучшее сцепление частиц материалов и снижается возможность их расслоения. В качестве увлажнителей применяют 20 %-й раствор глицерина в спирте, а также веретенное или вазелиновое масла.

После загрузки шихты в пресс-форму выполняют холодное прессование (брикетирование). Эту операцию совершают при комнатной температуре и давлении, величина которого определяется в зависимости от состава связки (для кругов на металлических связках применяют давление 196–294 Па, т. е. 2000–3000 кг/см<sup>2</sup>).

После брикетирования полученное достаточно плотное и прочное, но еще пористое изделие извлекают из пресс-формы брикетницы и помещают в пресс-форму для спекания и уплотнения. При спекании за счет образования расплавов отдельных компонентов связки, а также в результате уплотнения массы в горячем состоянии снижается пористость и повышается прочность спрессованного брикета. Температура спекания зависят от температур плавления компонентов, входящих в состав связки и составляет 600–1200 °С.

Поскольку опрессованная рабочая поверхность алмазоносного слоя получается гладкой ввиду того, что зерна алмаза располагаются на одном уровне со связкой, необходимо обнажить зерна, чтобы их части, выступающие из связки, могли резать стекло. Для этого производят вскрытие зерен, находящихся на поверхности алмазоносного слоя, посредством удаления связки шлифованием свободным абразивным порошком, абразивным бруском или ее поверхностного растворения азотной или соляной кислотами.

После вскрытия производят балансировку круга.

## **Глава 7. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

### **7.1. Обработка по методу свободного притирания**

Сущность метода заключается в том, что две поверхности при взаимном притирании самоисправляются и приобретают правильную геометрическую форму одинаковой кривизны: либо сферическую (одна – выпуклая, другая – вогнутая), либо плоскую. Причем на стадии шлифования заготовка притирается к обрабатывающей поверхности твердого шлифовальника, а при полировании мягкие подложки полировальника притираются к шлифованной поверхности заготовки стекла.

Обработка деталей методом притирания обеспечивает максимальную точность по сравнению с другими методами. Этот способ является весьма старым и получил название классического.

Метод свободного притирания определяется наличием нескольких признаков:

- 1) контакт притирающихся поверхностей инструмента и заготовки обеспечивается силовым замыканием;
- 2) одна из притирающихся поверхностей самоустанавливается на другой благодаря наличию шарового шарнира;
- 3) наладочные параметры станка выбирают так, чтобы все точки на притирающихся поверхностях инструмента и детали находились в многократном аperiodическом контакте.

Свободным притиранием можно получать весьма точные поверхности на грубом оборудовании и грубым инструментом.

### **7.2. Обработка по методу «Синхроспид»**

#### ***7.2.1. Сущность метода***

Название метода «Синхроспид» относится к системе, включающей в себя специальный тип станков, инструменты и ЭВМ с программой для определения регулируемых параметров технологического оборудования и инструментов, зависящих от характеристики обрабатываемой детали.

Сущность метода «Синхроспид» состоит в том, что в процессе обработки инструмент и заготовка точно расположены по отношению

друг к другу и индивидуально приведены во вращение, т. е. перемещение верхнего звена относительно нижнего отсутствует.

В методе «Синхроспид» тонкое шлифование и полирование выполняют инструментами, на корпусе которых наклеены соответственно алмазные таблетки и полировочная пленка толщиной 0,5 мм (инструменты 1 и 2 на рис. 7.1). Для настройки шлифовальника на требуемый радиус кривизны используют дополнительный наладочный инструмент 3, которым также прижимают полировочную пленку при ее наклеивании на корпус полировальника.

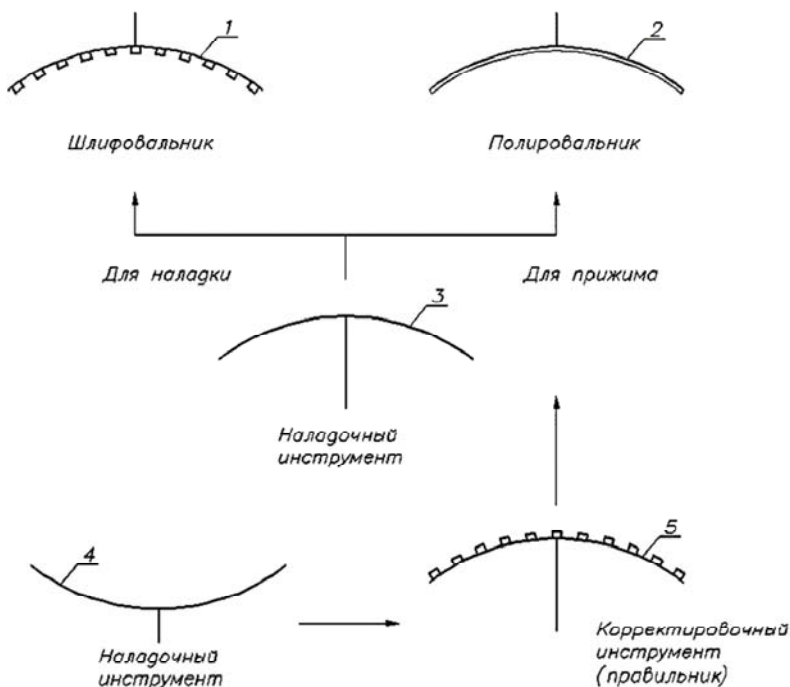


Рис. 7.1. Набор инструментов для вогнутой поверхности

Правку полировальника с целью придания ему заданного радиуса производят корректирующим инструментом (правильником) с наклеенными алмазонасными таблетками (инструмент 5 на рис. 7.1). Для настройки этого правильника используют дополнительный наладочный инструмент 4.

Следовательно, для каждой поверхности линзы необходимо дополнительно использовать три вспомогательных высокоточных инструмента, доводка и правка которых осуществляются при помощи рычажных станков типа ШП опытным оптиком, выполняющим функции оптика-инструментальщика. Наладка инструментов должна проводиться с большой тщательностью, поскольку их точность в методе «Синхроспид» обеспечивает заданный уровень качества и точности оптических поверхностей (деталь копирует форму инструмента), в то время как в условиях свободного притирания данная взаимосвязь проявляется в значительно меньшей степени. Кроме того, метод «Синхроспид» может быть реализован только на прецизионном технологическом оборудовании, позволяющем точно устанавливать регулируемые параметры, что практически не требуется в методе свободной притирки.

### 7.2.2. *Обработка плоских поверхностей*

Рассмотрим рис. 7.2, на котором деталь 2 установлена с эксцентриситетом  $e$  относительно инструмента 1 и в процессе обработки не совершает переносного (осциллирующего) движения. При этом инструмент и деталь вращаются попутно с угловыми скоростями соответственно  $\omega_1$  и  $\omega_2$ .

На обрабатываемой поверхности выделим произвольную точку  $M$  и определим вектор скорости скольжения  $\vec{V}_{\text{ск}}$ :

$$\vec{V}_{\text{ск}} = \vec{V}_2 - \vec{V}_1, \quad (7.1)$$

где  $\vec{V}_2 = \bar{\omega}_2 \bar{r}_2$  и  $\vec{V}_1 = \bar{\omega}_1 \bar{r}_1$  – векторы линейной скорости верхнего и нижнего звеньев в рассматриваемой точке  $M$ , расположенной на расстоянии  $\bar{r}_2$  и  $\bar{r}_1$  от осей вращения детали и инструмента соответственно.

Поскольку, как видно из рис. 7.2, справедливо векторное равенство

$$\bar{r}_2 = \bar{e} + \bar{r}_1,$$

то в случае, когда  $\omega_2 = \omega_1$ , выражение (7.1) принимает вид



$$\vec{V}_{\text{ск}} = \vec{\omega} \vec{e},$$

где  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости инструмента и заготовки.

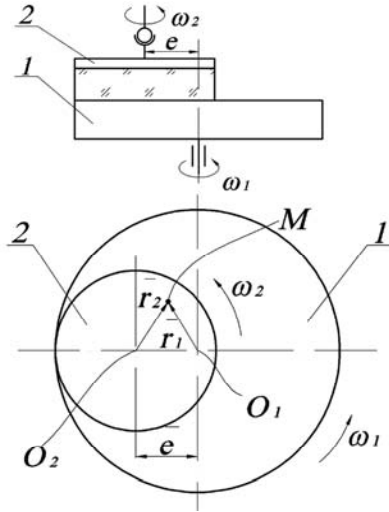


Рис. 7.2. Схема обработки плоских поверхностей по методу «Синхроспид»: 1 – инструмент; 2 – деталь

Следовательно, если инструмент и заготовка, установленные с эксцентриситетом, вращаются одинаково с равными скоростями, то величина скорости скольжения во всех точках на обрабатываемой поверхности будет одинаковой.

Кроме отмеченного, при реализации данного метода выполняют также оптимизацию рабочей поверхности инструмента. В качестве примера оптимизации плоского инструмента 1, на котором установлена деталь 2, рассмотрим рис. 7.3, где  $S_0$  – площадь постоянного контакта соприкасающихся поверхностей. По условиям оптимизации форма рабочей поверхности инструмента должна быть такой, чтобы суммарная длина его активных площадок на окружности радиусом  $R_i$ , произвольно выбранной вне зоны постоянного контакта, равнялась длине дуги  $ABC$ , представляющей собой часть упомянутой окружности, в пределах которой деталь непрерывно контактирует с инструментом.

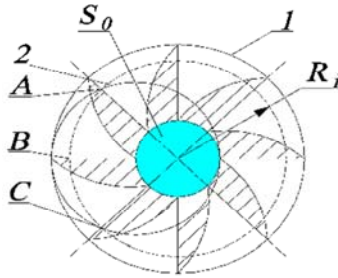


Рис. 7.3. Оптимизация рабочей поверхности плоского инструмента при обработке по методу «Синхроспид»:  
 1 – инструмент; 2 – деталь

### 7.2.3. Обработка сферических поверхностей

При обработке сферических деталей по методу «Синхроспид» также необходимо добиться наиболее равномерного распределения скоростей скольжения по формируемой поверхности. Для выяснения условий, обеспечивающих это требование, рассмотрим рис. 7.4, где деталь 2 с углом раствора  $\alpha$  установлена под углом  $\beta$  к оси инструмента 1.

Принимаем, что скорости скольжения в точках 3 и 4  $v_{ск3}$  и  $v_{ск4}$  равны между собой. Поскольку, как видно из рис. 7.4, б):

$$v_{ск4} = R \sin(\beta - \alpha)\omega_1 + R \sin \alpha \omega_2;$$

$$v_{ск3} = R \sin(\beta + \alpha)\omega_1 - R \sin \alpha \omega_2,$$

то, приравняв эти равенства:

$$2 \sin \alpha \omega_2 = \omega_1 [\sin(\beta + \alpha) - \sin(\beta - \alpha)],$$

получим соотношение

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{\sin(\beta + \alpha) - \sin(\beta - \alpha)}{2 \sin \alpha},$$

из которого следует, что  $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \cos \beta$ .

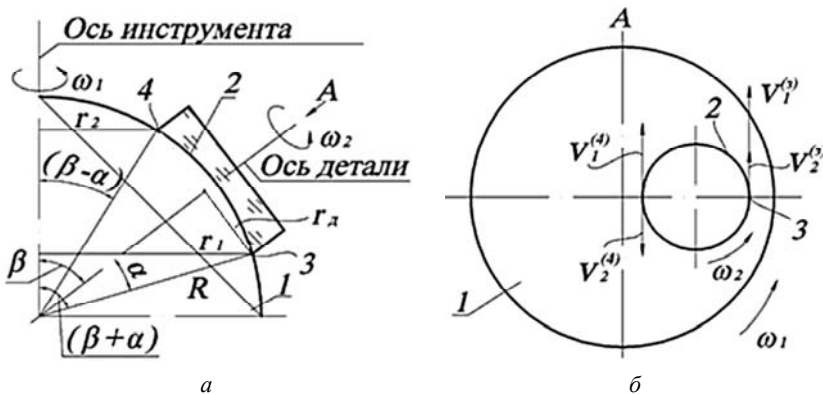


Рис. 7.4. Обработка деталей по методу «Синхроспид» с учетом угла  $\beta$  (а) и скоростей скольжения (б):  
 1 – инструмент; 2 – деталь;  
 3, 4 – точки, в которых определяется скорость скольжения

Таким образом, в случае обработки линз по методу «Синхроспид» величина угла между осями вращения заготовки и инструмента зависит от соотношения скоростей их вращения.

### 7.3. Магнитореологическое полирование оптических деталей

#### 7.3.1. Сущность метода

Наиболее сложным в технологии производства оптических деталей является локальное (фрагментарное) полирование, основанное на зонном удалении материала. Такой процесс требует высокоточного управления скоростями вращения и перемещения инструмента относительно детали. Это реализуется на станках с числовым программным управлением (ЧПУ), позволяющими реализовать движение инструмента в пространстве согласно специальным доводочным алгоритмам. Кроме управления законом движения инструмента необходимо также, чтобы последний обладал возможностью мгновенно адаптироваться к форме обрабатываемой поверхности, а скорость съема припуска в процессе полирования была известна и постоянна во времени.

Традиционные зонные инструменты, использующие упругие основания, которые поджимаются сжатым воздухом к обрабатываемой поверхности, не позволяют получить нужный уровень адаптивности и стабильности. Эти требования можно обеспечить при использовании в качестве инструмента жидкой среды в виде абразивной суспензии, которая может легко адаптироваться к любой форме поверхности. При этом в зависимости от параметров процесса (скорости течения жидкости и размера абразивных частиц) съём материала может меняться от интенсивной, что требуется на стадии шлифования, до мягкой обработки (полирования).

Принцип использования жидкой среды в качестве рабочего инструмента положен в основу технологии магнитореологического (МР) полирования (торговая марка MRF).

### ***7.3.2. Основы технологии магнитореологического полирования***

Основным элементом МР полирования является МР полирующая жидкость, свойства которой изменяются под воздействием магнитного поля таким образом, что жидкость преобразуется в пластичный материал. МР жидкость состоит из ферромагнитных частиц диаметром до 0,1 мкм, взвешенных в несущей среде. Под воздействием магнитного поля частицы намагничиваются и выстраиваются в цепочки, которые образуют пространственную структуру с увеличивающейся упругостью. При отсутствии магнитного поля частицы возвращаются в свободное состояние и начальные свойства МР жидкости восстанавливаются.

В состав полирующей МР жидкости входят четыре компонента: вода, магнитные частицы, абразив и химические добавки. Выбор воды в качестве несущей среды обусловлен тем, что вода служит химическим агентом при обработке стекол. Такая МР жидкость представляет собой бингамовский пластичный материал с упругостью, управляемой магнитным полем (жидкость, которая изменяет свою упругость под воздействием, например, магнитного поля, называется бингамоновской).

Преимуществом МР полирования является то, что благодаря постоянному контролю за параметрами обрабатываемой жидкости и поддержанию их стабильности во времени полировальный инструмент не изнашивается. Отходы полирования и тепло непрерывно отводятся.

## **Глава 8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТИПОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

### **8.1. Проектирование технологических процессов**

В основу разработки технологических процессов положены два принципа – технологический и экономический. Первый предусматривает обеспечение выполнения всех требований чертежей, а второй – выполнение этих требований с минимальными затратами сырьевых, энергетических и людских ресурсов. Технологический процесс изготовления той или иной детали должен быть оптимальным для данного предприятия.

При всем многообразии оптических деталей все они характеризуются общностью выполнения отдельных операций по их изготовлению. Это позволяет при разработке технологического процесса для изготовления какой-либо детали за основу брать типовой технологический процесс (ТП) с включением в него дополнительных операций, учитывающих конструктивно-технологические особенности данной детали.

Разработка типового технологического процесса сводится к следующему:

1. Все детали группируют в классы в зависимости от конфигурации и размеров, точности изготовления, типов оборудования, средств контроля и т. п.

2. Устанавливают комплексную деталь, содержащую все геометрические элементы деталей данного класса.

3. Для комплексной детали каждого класса разрабатывают типовой технологический процесс, который с небольшими изменениями (подналадкой оборудования, введением дополнительных приспособлений, операций и т. п.) можно применить при обработке любой детали, входящей в данный класс.

Комплексная деталь может быть реальной или условной. В качестве реальной выбирают наиболее сложную деталь данного класса, а в качестве условной – деталь, содержащую все геометрические элементы (поверхности, углы, фаски и т. п.) деталей данного класса.

Для ускорения подготовки производства целесообразно использовать автоматическую систему технологической подготовки оптического производства на базе вычислительной техники с использованием пакетов прикладных программ.

## 8.2. Технология изготовления плоскопараллельных пластин и клиньев

### 8.2.1. Грубое и среднее шлифование (фрезерование)

Задачей грубого шлифования является придание заготовкам формы будущих деталей с основными размерами.

При использовании заготовок в виде прессованных пластин (штабиков) первой операцией является распиливание заготовки с припуском на линейные размеры. При использовании штучных заготовок (прессовок) обработку начинают со сборки блока и установки его на столе плоскошлифовального станка. Заготовки размерами менее  $5 \times 50 \times 100$  мм устанавливают плотно одна к другой на поверхности электромагнитного стола фрезерного станка, а по его контуру размещают стальные планки. Обработку выполняют кольцевым алмазным инструментом (фрезами) зернистостью от 200/160 до 50/40. Крупнозернистый инструмент применяют для обработки поверхностей больших размеров и подвергающихся вторичному шлифованию алмазным инструментом зернистостью 50/40 или микропорошком М28. При небольших припусках на поверхность (порядка 1 мм) применяют однократное шлифование алмазной фрезой зернистостью 63/50–50/40. Толщина слоя стекла, снимаемая с первой поверхности заготовки, определяется величиной, требуемой для удаления дефектов прессования (складки, точки, шамот). Оставшуюся часть припуска, предусмотренного на данную операцию, снимают при шлифовании второй поверхности.

После обработки первой поверхности выполняют разблокировку (разборку) блока и последующую блокировку для обработки второй стороны. Заготовки отклеивают от пластин с помощью электроплит, а пластины промывают в горячем ( $90^\circ\text{C}$ ) 4 %-м растворе кальцинированной соды. При обработке второй поверхности выдерживают толщину деталей и их параллельность, последняя из которых задается в угловой мере. Переход от углового измерения к линейному осуществляется по формуле

$$\Delta T = 0,0003\theta D,$$

где  $\Delta T$  – допуск на разность толщин в диаметральных точках пластины или блока, мм;

$\theta$  – допуск в угловых минутах на параллельность (клиновидность);

$D$  – диаметр (или длина) детали или блока.

Если допуск  $\theta$  задан в угловых секундах, то вместо коэффициента 0,0003 необходимо использовать коэффициент 0,000005 ( $0,0003 = \text{tg}1'$ ;  $0,000005 = \text{tg}1''$ ).

Толщину плоских деталей измеряют штангенциркулем, микрометром или скобой, а плоскостность – индикаторным кольцевым сферометром, лекальной линейкой или притиркой к контрольной планшайбе.

Заготовки плоских деталей небольшой партии обрабатывают абразивной суспензией путем ручного перемещения заготовок по вращающемуся шлифовальнику (на станке модели ОС-350). Заготовки размером до 100 мм наклеивают на планшайбу, а больших размеров – обрабатывают по одной штуке. В процессе обработки заготовки необходимо перемещать через центр шлифовальника с повышением на них в этот момент давления, что обеспечивает получение плоской поверхности детали и равномерный износ шлифовальника. Обе поверхности пластины при ручной обработке шлифуют последовательно шлифпорошком № 6–4 и микропорошками М40 и М28 до сошлифовывания следов прессования или предшествующей обработки, выдерживая необходимую толщину и параллельность.

При изготовлении клиньев заготовки 1 (рис. 8.1, а) либо вклеивают в пазы металлических приспособлений 2, либо наклеивают на специальные стеклянные или металлические сухарики 3 (рис. 8.1, б). В обоих случаях угол наклона опорных плоскостей должен быть равен заданному углу  $\alpha$  клина. При обработке выдерживают размер  $a$ .

После грубого и среднего шлифования исполнительных поверхностей пластин выполняют их сборку в столбики для обработки боковых (нерабочих) поверхностей. С этой целью детали нагревают и склеивают воском в специальных угольниках. Заготовки круглой формы обрабатываются по диаметру на круглошлифовальном станке, а более сложной формы – на фрезерном станке модели СФ-7 с программным управлением.

Заключительной операцией предварительной обработки заготовок является их фасетирование (на данной операции на пластины и клинья наносят конструктивные, т. е. окончательные по размеру

фаски), выполняемое вручную с использованием алмазных чашек (для круглых деталей) или планшайбы (для прямоугольных деталей), закрепленных на шпинделе станка (обдирочного или шлифовально-полировального). Радиус чашек  $R$  определяется заданным углом  $\varphi$  наклона фаски и диаметром  $D$  пластины (рис. 8.2):

$$R = \frac{D}{2 \cos \varphi}.$$

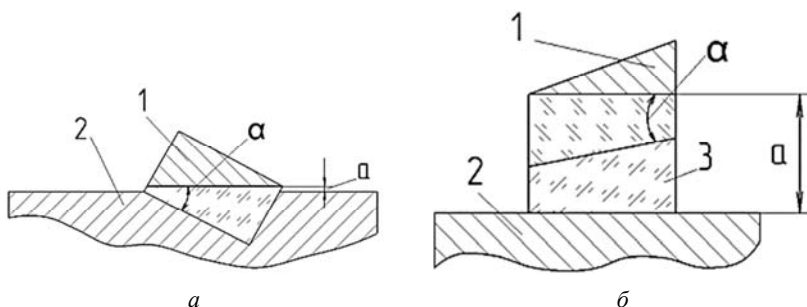


Рис. 8.1. Приспособление металлическое и с сухариками для обработки клиньев:  
*a* – металлические приспособления; *б* – приспособления с сухариками;  
 1 – клин; 2 – приспособление; 3 – сухарик

Фаску можно снять также с помощью обычной металлической чашки (рис. 8.2) и абразивной суспензии (М40 – М20).

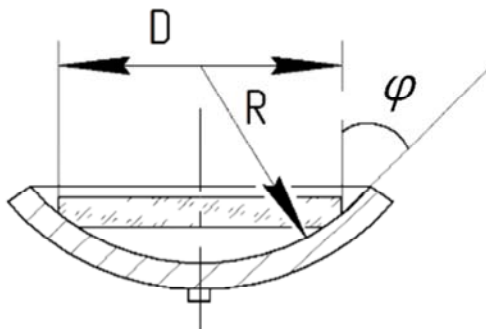


Рис. 8.2. Фасетировочная чашка



### 8.2.2. Мелкое шлифование

Задачами мелкого шлифования являются уточнение размеров заготовки после среднего шлифования и улучшение качества поверхности (придание ей более мелкой структуры) с целью ускорения последующего полирования.

Технологический процесс начинается с выполнения сборки блока (блокировки).

Соединение заготовок с приспособлением (наклеечником) осуществляется приклеиванием наклеечными смолами. Крепление смолами может быть двух типов: эластичное и жесткое. Наиболее универсальным является эластичное крепление, которое за счет большой толщины слоя смолы обеспечивает меньшие деформации обрабатываемых заготовок, что важно при получении поверхностей с жесткими допусками по  $N$  и  $\Delta N$ .

На заготовки малых размеров смола наносится в виде сплошных подушек вручную или на наклеечном полуавтомате, а на более крупных заготовках (размером 80–100 мм) – в виде полосок или точек. Последний вид крепления применяют в единичном и мелкосерийном производстве, а также для деталей малой жесткости (с малой относительной толщиной  $t:D$ ). В крупносерийном и массовом производствах целесообразнее применять жесткий метод крепления, как менее трудоемкий.

Мелкое шлифование выполняют на станках модели ШП методом свободного притира водными суспензиями микропорошков М20 и М10 в два перехода или в один переход алмазным инструментом в виде планшайбы с нанесенными на ее рабочую поверхность алмазосодержащими элементами.

Толщина слоя стекла  $\Delta h$ , которую необходимо сошлифовать микропорошком каждой зернистости, равна разности в глубине рельефных слоев  $F_{M_{n-1}}$  и  $F_{M_n}$ , нарушенных абразивом  $F_{M_{n-1}}$  предшествующей и абразивом  $F_{M_n}$  данной фракций, т. е.

$$\Delta h = F_{M_{n-1}} - F_{M_n}.$$

Практически это обеспечивается визуальным (или с помощью лупы) наблюдением за фактурой (степенью шероховатости) шлифуемой

поверхности детали. Поскольку при мелком шлифовании толщина детали изменяется мало, то ее контролируют только при изготовлении точных плоскопараллельных пластин или клиньев.

Плоскостность поверхности после мелкого шлифования проверяют лекальной линейкой или пробным стеклом (в последнем случае на шлифованную поверхность наносят несколько штрихов восковым карандашом и тщательно растирают этот воск салфеткой).

Для ускорения полирования большое значение имеет чистота поверхностей деталей после мелкого шлифования. При мелком шлифовании дефектами являются царапины, мелкие точки, неравномерность шероховатого слоя, увеличенная глубина выколов или недошлифовка отдельных зон поверхности. Дефекты обнаруживают с помощью лупы не менее  $3^x$  увеличения при ярком освещении контролируемой поверхности.

### 8.2.3. Полирование

Одной из особенностей обработки деталей в блоке по методу свободного притирания является следующее требование: поверхность обрабатывающего инструмента (шлифовальника и полировальника) должна быть концентрична поверхности обрабатываемого блока. Поэтому после окончания шлифования, тщательной промывки и контроля какой-либо поверхности блока ее необходимо отполировать в том же блоке.

Операция полирования деталей должна обеспечивать:

1) прозрачность, т. е. отсутствие следов шлифования (шероховатость  $R_z 0,05$ );

2) заданную точность кривизны в заданных пределах по общим ( $N$ ) и местным ( $\Delta N$ ) ошибкам;

3) требуемый класс чистоты  $P$  (чистота оптических деталей  $P$  нормируется по 14-ти классам: 1-10, 1-20, 1-40, I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, VIIIa, IX, IXa).

Для обеспечения первого требования снимают слой стекла толщиной несколько микрон. Наиболее трудно выполнение второго условия, когда снимается слой стекла в доли микрон. В целом процесс полирования весьма трудоемок.

Полирование выполняют способом свободной притирки на станках того же типа, что и мелкое шлифование. В качестве материала

подложки полировальника наиболее широко используют полировочную смолу и волокнистые материалы (войлок, фетр, сукно, замша).

Полирование волокнистыми материалами применяется для изготовления оптических деталей с большим допуском по  $N$  и  $\Delta N$  ( $N = 10-15$ ;  $\Delta N = 2-5$ , т. е. конденсорная и окулярная оптика). Волокнистые полировальники изготавливают следующим образом: подложку кладут на слой размельченной смолы, покрывающей поверхность разогретого полировального инструмента, и обжимают ее шлифовальником непосредственно на станке. Полирование волокнистыми материалами может быть интенсивным.

При изготовлении точных оптических деталей (по  $N$  и  $\Delta N$ ) используют смоляной полировальник. Для получения плоской смоляной подложки расплавленную смолу выливают на инструмент (план), обклеенный по периметру плотной бумагой. После затвердевания в середине подложки делают углубление для того, чтобы смола в процессе полирования могла растекаться и принимать форму поверхности блока.

Для обеспечения распределения полирующей суспензии по поверхности полировальника на нем делаютрезы-канавки в виде сетки или спирали. Этирезы способствуют также лучшей приработке поверхности полировальника к поверхности блока. Нельзя располагатьрезы симметрично относительно середины (центра) полировальника, так как при этом поверхность блока будет обрабатываться неравномерно.

Перед началом полирования полировальник следует слегка нагреть теплой водой, смочить полирующей суспензией и окончательно формовать поверхностью обрабатываемого блока вручную.

Для нормального течения процесса полирования необходимо предварительно правильно выбрать вязкость смолы подложки. Оптимальное значение вязкости смолы зависит от режима полирования и температуры окружающей среды. При повышении скорости, давления и температуры воздуха на участке, а также при ограниченной подаче полирующей суспензии вязкость смолы должна увеличиваться. С повышением требований к точности полирования (по  $N$  и  $\Delta N$ ) вязкость смолы следует понижать. Также обильная непрерывная подача суспензии позволяет работать при меньшей вязкости смолы.

В процессе полирования оптических деталей постоянно контролируют  $N$  и  $\Delta N$  и при необходимости проводят изменения наладочных

параметров станка. При сорванном крае полируют наименьшим количеством полирита, уменьшают давление на верхний инструмент и скорость вращения шпинделя, осуществляют общую подрезку полировальника (можно еще взять более твердую смолу).

При астигматической поверхности уменьшают скорость вращения шпинделя, увеличивают давление на верхний инструмент и длину штриха поводка, смещают поводок вперед или назад, выполняют общую подрезку полировальника.

Для устранения местного бугра поводок смещают назад или вперед на 0,1 диаметра блока, увеличивают давление и скорость вращения кривошипа. Для устранения местной ямы поводок смещают на 0,1 диаметра блока и уменьшают давление. Местные ошибки возникают как результат несоответствия размеров инструмента и блока и грубых ошибок в настройке станка.

«Цвет» регулируют применением одного-двух приемов, создавая условия для плавного изменения зонального срабатывания. Применение сразу всех приемов вызывает резкое изменение зонального срабатывания стекла и приводит к образованию асферической поверхности.

Необходимо учитывать, что кроновые стекла полируются хорошо, а флинтовые являются мягкими и легко царапаются. Тяжелые кроны легко покрываются налетами.

В процессе полирования могут появиться следующие дефекты: точки (причины – недоброкачественное шлифование, недополировка), царапины (причины – плохая промывка блока перед полированием, загрязнение полирующей суспензии или полировальника, грязное рабочее место, неправильное наложение РПС), выколки (причина – небрежная работа), налеты (причины – загрязнение полирующей суспензии или защитного лака, длительное хранение незащищенных лаком деталей), неправильный «цвет» (причины – недоброкачественное шлифование, неправильный режим полирования, деформация наклеичной смолы, длительное хранение блока), отклейка деталей (причина – промывание блока холодной водой).

По окончании полирования первой стороны обрабатываемых деталей (должна быть достигнута требуемая плоскостность, т. е.  $N$ ,  $\Delta N$  и чистота поверхности) блок снимают со станка, промывают в теплой воде, лакируют и подают на разблокировку с последующей блокировкой для обработки второй стороны. Технология обработки второй стороны аналогична первой.

Операция лакировки заключается в нанесении слоя нитроэмали на полированную поверхность еще не снятых с блока пластин. Нитроэмаль наносят кистью. Нитроэмаль должна быть любого темного цвета для того, чтобы при контроле второй стороны пластины и наложении РПС лучше была видна интерференционная картина.

Наиболее распространенным способом разблокировки оптических блоков является охлаждение их в камере при температуре от  $-30$  до  $-50$  °С. Отделение заготовок от приспособления (наклеенника) происходит в результате тангенциальных сил, возникающих в склеивающем слое за счет разности ТКЛР смолы  $(6-10) \cdot 10^{-3}$  и стекла  $(6-10) \cdot 10^{-7}$  °С<sup>-1</sup>.

Применяется также ультразвуковой способ разблокировки. Отделение заготовок в данном случае происходит в результате неодинаковой частоты вынужденных собственных колебаний металлического наклеенного приспособления, смолы и стекла.

При шлифовании пластин и клиньев необходимо учитывать следующее. В результате проникновения жидкости в трещины слоя стекла, нарушенного шлифованием, в самом стекле образуются продукты его гидролиза, которые вызывают возникновение расклинивающих усилий. Под их действием поверхностные слои стекла растянуты. У пластинки, обе поверхности которой отшлифованы, растягивающие усилия уравновешены. Удаление нарушенного слоя в процессе полирования одной из поверхностей нарушает это равновесие, но так как положение заготовок на приспособлении зафиксировано, то деформация произойдет после их освобождения от закрепления. Глубина нарушенного слоя, величина напряжений и деформаций диска будут тем меньше, чем мельче абразив.

#### ***8.2.4. Доводка в сепараторах***

Для деталей с высокими требованиями к плоскостности полированной поверхности ( $N \leq 1$ ,  $\Delta N \leq 0,1$ ) применяют доводку в сепараторах. Сепаратор представляет собой диск (рис. 8.3, а) из стекла ЛК5, ЛК7 (малый коэффициент термического расширения) толщиной  $t = 30-80$  мм ( $t \cong 0,1D$ ). Рабочая поверхность сепаратора отполирована с точностью  $N = 1$  и  $\Delta N = 0,1-0,4$ . В диске имеется несколько отверстий, каждое из которых на 5–10 % больше диаметра обрабатываемых деталей. Отверстия в сепараторе (см. рис. 8.3, а)

расположены на разных угловых расстояниях друг от друга ( $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$ ) и на различных расстояниях от центра ( $R_1 \neq R_2 \neq R_3$ ), что уменьшает вероятность образования зональных (местных) ошибок. Суммарная площадь отверстий не превышает 30 % всей площади сепаратора.

Сепаратор 2 устанавливают на полировальник 1 (рис. 8.3, б). В отверстия сепаратора укладывают пластины 3, предварительно отполированные с  $N \leq 2$  и  $\Delta N \leq 0,3$ . Стенки отверстий сепаратора обклеивают резиной 4. Если деталь тонкая, то на нее устанавливают кружок сукна 5 и груз 6. При необходимости устранить клин груз устанавливают на толстый край детали.

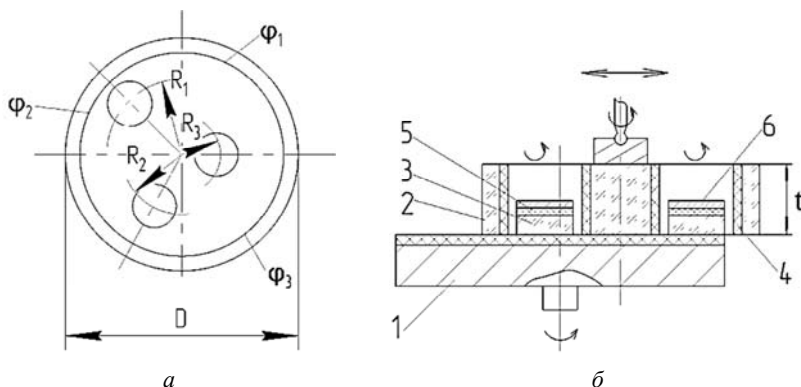


Рис. 8.3. Доводка плоских деталей (б) в сепараторе с отверстиями (а):  
1 – полировальник; 2 – сепаратор; 3 – обрабатываемые пластины;  
4 – резина; 5 – сукно; 6 – груз

При движении сепаратора по полировальнику он своей рабочей поверхностью формирует полировочную смолу. Детали, перемещаясь по полировальнику, принимают форму его поверхности (детали практически не участвуют в формировании полировальника, поскольку их удельное давление на поверхность последнего меньше, чем давление сепаратора). Диаметр полировальника принимают равным 1,1–1,3 диаметра сепаратора.

В процессе доводки деталей в сепараторах повышению точности формообразования способствуют также следующие факторы:

1) исключение приклеивания к приспособлению и связанных с этим деформаций;

2) приближение прижимного усилия к плоскости обработки детали, что уменьшает опрокидывающий момент и его неравномерное влияние на износ;

3) отсутствие выхода детали за край полировальника и неравномерное распределение давления по ее поверхности;

4) сложное движение детали по поверхности полировальника.

Все это существенно уменьшает вероятность образования зональных ошибок.

При обработке в сепараторе деталей прямоугольной формы равномерное вращение последних затруднено, что неблагоприятно сказывается на точности их формообразования, поэтому на такие детали надевают неметаллические кольца.

### ***8.2.5. Контроль плоскостности и клиновидности полированных пластин***

Для контроля качества полированных поверхностей оптических деталей используют интерференционный метод, в частности метод пробных стекол. Точность оценки кривизны интерференционных полос (интерференционные кольца переводят в интерференционные полосы) в данном методе достигает 0,1 полосы, т. е. качество поверхностей контролируется с точностью порядка 0,03 мкм. Использование монохроматического света повышает резкость интерференционной картины и точность контроля.

Метод пробных стекол имеет известные недостатки, которых лишен бесконтактный метод контроля на интерферометрах, где используется интерференция между эталонной и контролируемой поверхностями. Воздушный зазор в этом случае имеет значительную величину (порядка нескольких миллиметров), и его можно регулировать механическими устройствами. Принципиальная оптическая схема интерферометра для контроля плоскостей и плоскопараллельности приведена на рис. 8.4.

Источник света 1 (ртутная лампа) с помощью конденсорных линз 2 и 4 и зеркала 3 освещает раздвижную щелевую диафрагму 5, установленную в фокальной плоскости объектива 7. Параллельный пучок лучей, выходящий из объектива 7, попадает на клиновидную пластину 8 и контролируемую деталь 9. Нижняя поверхность клиновидной пластины 8 является эталонной. В воздушном клине между

проверяемой и эталонной поверхностью возникают интерференционные полосы разной толщины, которые локализованы на нижней поверхности пластины 8. Пучки лучей, отраженные от этих поверхностей, проходят через объектив 7, отражаются полупрозрачной пластиной 6 и поступают в окуляр 10.

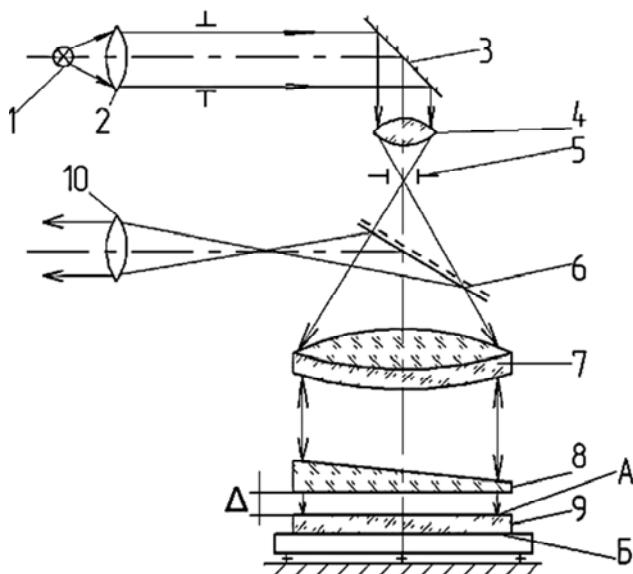


Рис. 8.4. Оптическая схема интерферометра для контроля плоскостей:  
 1 – источник; 2, 4 – конденсор; 3 – зеркало; 5 – диафрагма; 6 – светоделитель;  
 7 – объектив; 8 – эталон; 9 – контролируемая деталь; 10 – окуляр

Интерферометр может быть использован также и для контроля плоскопараллельности (клиновидности) пластин. Для этого наблюдают интерференционную картину между полированными поверхностями А и Б этой пластины и определяют угол клина по формуле

$$\alpha = \frac{N\lambda}{2n_{\lambda}l},$$

где  $N$  – число колец или полос на длине  $l$  поверхности детали;

$\lambda$  – длина волны монохроматического источника света;

$n_{\lambda}$  – показатель преломления стекла пластины 9 для данной  $\lambda$ .



Чтобы выполнить такое измерение, необходимо учесть следующее. Известно, что для наблюдения интерференционной картины с достаточной видимостью (например, с  $V = (E_{\max} - E_{\min}) / (E_{\max} + E_{\min}) \approx 0,1$ , где  $E_{\max}$  и  $E_{\min}$  – максимальная и минимальная освещенность интерференционных полос) в интерференционной схеме необходимо обеспечить условия, при которых максимальная разность хода интерферирующих световых пучков значительно меньше длины когерентности  $L = \lambda^2 / \Delta\lambda$  для применяемого источника света ( $\Delta\lambda$  – спектральный интервал интерферирующего излучения). Поэтому для наблюдения интерференционной картины между поверхностями А и Б детали 9 необходимо добиться исчезновения интерференции между поверхностью А детали 9 и эталонной поверхностью пластины 8, что обеспечивается увеличением зазора  $\Delta$ .

Для измерения угла клина используют гониометры и различные автоколлимационные приборы. Одна из схем автоколлимационного прибора приведена на рис. 8.5.

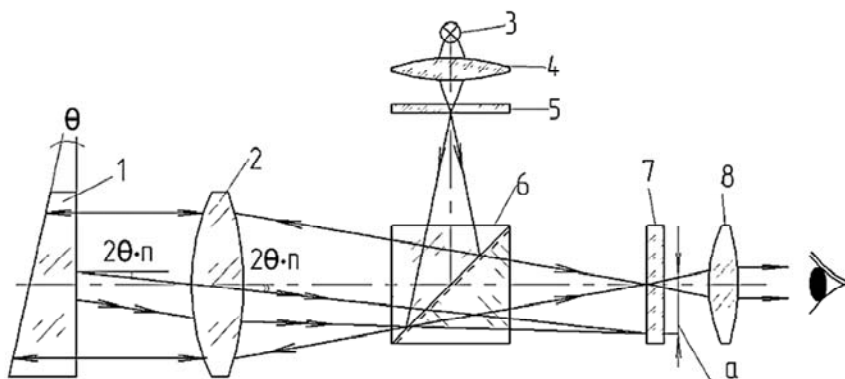


Рис. 8.5. Оптическая схема прибора для контроля угла клина:  
 1 – контролируемый клин; 2 – объектив; 3 – источник; 4 – конденсор;  
 5 – марка; 6 – призма-куб; 7 – сетка; 8 – окуляр

Пучок лучей через конденсор 4 освещает перекрестие сетки 5 и после отражения от светоделительного слоя куба-призмы 6 направляется объективом 2 на испытуемый клин 1. Отраженные от передней и задней поверхностей клина пучки лучей образуют в фокальной плоскости объектива на окулярной сетке 7 два автоколлимационных

изображения перекрестия сетки 5, расстояние  $a$  между которыми определяется по сетке 7 через окуляр 8 или с помощью окуляр-микрометра.

Угол  $\Theta$  рассчитывается по формуле

$$\Theta = \frac{\alpha}{2nf'},$$

откуда видно, что с увеличением  $f'$  точность измерения увеличивается.

### **8.3. Технология изготовления призм**

#### ***8.3.1. Грубое и среднее шлифование (предварительная обработка)***

Изготовление призм начинают с обработки боковых поверхностей, которая является окончательной и должна обеспечить требуемую ширину призмы. При серийном производстве эту обработку выполняют обычно на плоскошлифовальных станках модели ЗБ756 (взяты с металлообработки). Для этого заготовки закрепляют (приклеивают) наклеечным парафином на металлические плоскопараллельные прямоугольные пластины (планшайбы) и полученный блок устанавливают на электромагнитный стол станка. По окончании шлифования первой боковой поверхности детали разблокировывают путем нагрева на электроплите и после их промывки блокируют для обработки второй боковой поверхности.

При обработке боковых поверхностей призм вручную используют аналогичные блоки, которые шлифуют свободным абразивом № 6 и М40 на обдирочных станках мод. ОС.

Для контроля ширины призм и их разнотолщинности (используют, в основном, микрометр) в нескольких местах блока детали (зачастую – бракованные) приклеивают таким образом, чтобы они частично выступали за боковую поверхность наклеечника.

Для обработки исполнительных поверхностей при единичном производстве заготовки склеивают боковыми поверхностями в столбик (рис. 8.6). Длина столбика может быть примерно в 10 раз больше катета, но не превышать 200–250 мм. Склеивают наклеечным воском,

а при склеиваемой площади менее  $1 \text{ см}^2$  – шеллаком. Для склеивания используют приспособление в виде угольника, который предварительно нагревают.

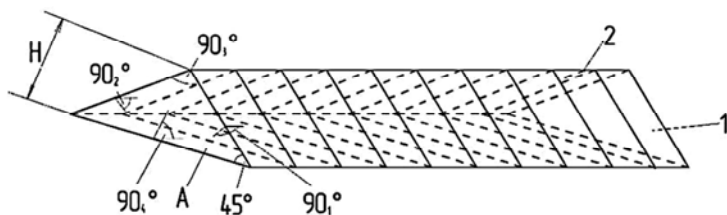


Рис. 8.6. Блок призм в виде столбика:  
1, 2 – катет призмы

Грубое шлифование (обдирку) столбика начинают с первого катета и продолжают до удаления следов прессования. При этом выдерживают угол  $90_1^\circ$  с базовой поверхностью столбика (за базовую поверхность принимают одну из боковых поверхностей столбика, например, поверхность А на рис. 8.6). Обдирку выполняют ручным перемещением столбика по шлифовальнику с соблюдением общих правил, обеспечивающих образование правильной плоскости. Для компенсации неравномерного давления правой и левой рук столбик периодически поворачивают на  $180^\circ$ .

Грубое шлифование поверхности второго катета выполняют тем же способом, но в этом случае выдерживают углы  $90^\circ$  с базовой поверхностью ( $90_2^\circ$ ) и первым катетом ( $90_3^\circ$ ). Затем обрабатывают поверхность гипотенузы, выдерживая угол  $90^\circ$  с базовой поверхностью ( $90_4^\circ$ ), симметричность углов  $45^\circ$  ( $\delta_{45^\circ}$ ), допустимую пирамидальность  $\pi$  и требуемую полноту (высоту)  $H$ .

Полноту столбика измеряют микрометром до снятия фаски на ребре угла  $90^\circ$ , образованного поверхностями катетов. Пирамидальность определяют как разность между полнотой противоположных концов столбика (призмы), т. е. разность размеров  $H$ .

После грубого шлифования исполнительных поверхностей призм на ребрах столбика снимают технологические фаски  $0,3-0,5 \text{ мм}$  и этот столбик направляют на среднее шлифование, где обработку проводят аналогичным образом. Затем на ребрах снимают оговоренные

чертежами фаски (конструктивные), столбик расклеивают (нагреванием), заготовки промывают и фасетируют (расклейку столбиков небольших призм выполняют только после шлифования и полирования всех их поверхностей).

При серийном производстве применяется обработка призм в металлических приспособлениях (рис. 8.7), в пазы которых закрепляют (приклеиванием наклеичным парафином по жесткому методу) по несколько столбиков (иногда используют приспособление с механическим зажимом). Точность выполнения в металлическом приспособлении угловых размеров пазов, по которым базируют призмы, должна быть выше заданной точности изготовления углов самих призм. На металлических приспособлениях обрабатывают призмы с погрешностью углов до 5–8'. Для получения призм на стадии предварительной обработки с погрешностью углов меньше 1–2' применяют приспособления из шлифованных стеклянных призматических брусков, углы которых могут быть выполнены с точностью до 20". Можно также отшлифованные в металлических приспособлениях столбики дополнительно обрабатывать (доводить) поштучно вручную на станке мод. ШП.

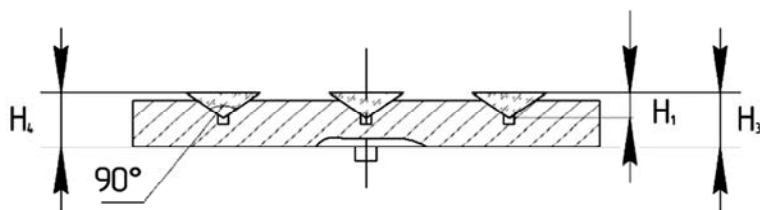


Рис. 8.7. Приспособление для крепления столбика призм

При обработке столбиков в приспособлениях контролируют высоту  $H$ ,  $\pi$  и  $\delta_{45^\circ}$ . Пирамидальность определяют как разность размеров  $H_1$  и  $H_2$  ( $H_2$  на рисунке не показан), измеренных на двух концах столбика. Для определения  $\delta_{45^\circ}$  измеряют величины  $H_3$  и  $H_4$  для столбиков, находящихся на противоположных сторонах приспособления.

При изготовлении призм с крышей сначала обрабатывают оба катета, выдерживая угол  $90^\circ$ . Затем к одному из этих катетов подгоняют одну из граней крыши, после чего обрабатывают вторую грань крыши, выдерживая с первой гранью угол  $90^\circ$ .

### 8.3.2. Контроль угловых размеров шлифовальных призм

Для контроля угловых размеров призм на стадии их шлифования используются слесарные угольники, механические угломеры и автоколлиматоры (гониометры) с добавочной плоскопараллельной полированной пластинкой. Угольники (настраиваются по эталонной призме) и угломеры позволяют измерять контактным методом (с оценкой контакта по зазору, т. е. на «глаз») углы между двумя плоскостями.

Значительно точнее углы шлифованных призм можно определить оптическим методом – с помощью, например, вертикального (перекидного) гониометра (рис. 8.8). Гониометр состоит из столика 1, регулируемого тремя винтами 2, и автоколлимационной трубы 3. На столике 1 закрепляют пластину 9 с точно отполированной поверхностью В.

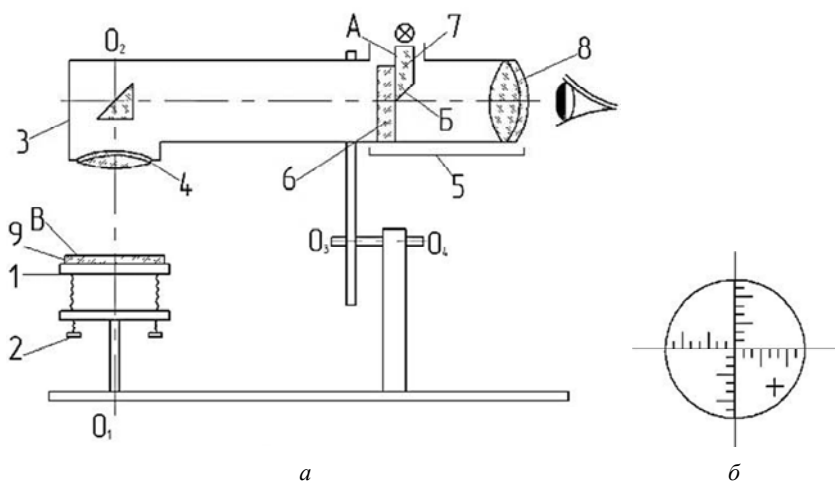


Рис. 8.8. Схема перекидного гониометра (а)  
с изображением марки в плоскости сетки (б):

- 1 – столик; 2 – юстировочные винты; 3 – автоколлимационная труба;
- 4 – объектив; 5 – автоколлимационный окуляр; 6 – сетка;
- 7 – призма подсветки; 8 – окуляр; 9 – эталонная пластинка

Перед началом измерений визирную ось зрительной трубы 3 устанавливают перпендикулярно поверхности В пластины 9. Для этого столик 1 вращают вокруг оси  $O_1O_2$  и в окуляр 8 наблюдают

за автоколлимационным (отраженным от поверхности В) изображением перекрестия призмы 7 в плоскости сетки б. Если блик смещается в поле зрения, то биение устраняют методом половинных поправок: одну часть компенсируют наклоном столика 1 с помощью винтов 2, а вторую – наклоном трубы 3 вокруг оси  $O_3O_4$ . Затем на поверхность В пластины 9 устанавливают призму с эталонным углом и наклоном трубы 3 вокруг оси  $O_3O_4$  настраивают прибор на требуемый угол (совмещают автоколлимационное изображение перекрестия с центром шкалы сетки б). Фиксируют трубу 3 и вместо эталонной призмы на столик 1 устанавливают контролируемую призму.

Для получения автоколлимационного блика от грани шлифованной призмы на этой грани фиксируют (на влагу) плоскопараллельную полировальную стеклянную пластинку. Удвоенную погрешность контролируемого угла оценивают по отклонению автоколлимационного перекрестия от центра шкалы сетки б.

### ***8.3.3. Мелкое шлифование и полирование (окончательная обработка)***

Окончательную обработку призм целесообразно выполнять в последовательности: «катет–катет–гипотенуза», поскольку при обработке грани гипотенузы в последнюю очередь наиболее удобно выдерживать допуски на  $\delta_{45^\circ}$  и пирамидальность.

При изготовлении призм невысокой точности (с допуском на углы  $>5'$ ) используют эластичный способ приклеивания заготовок смолой к приспособлению с пазами или крепление гипсованием. Сборка блока при эластичном способе блокирования начинается с наклеивания на нагретые заготовки смоляных подушек, после чего заготовки устанавливают (притирают) на рабочую плоскость шлифовальника. Расположение заготовок должно соответствовать установочным элементам (пазам) наклеечного приспособления, которое в разогретом виде опускают на заготовки со смолой. После оплавления смолы и остывания блока заготовки плотно закрепляются на наклеечном приспособлении.

Перед блокировкой призм (столбиков) для обработки гипотенузой грани первоначально «связывают» эту грань с обоими катетами, т. е. подгоняют разность углов  $45^\circ$ . Для этого вручную гипотенузную грань призмы подшлифовывают микропорошком М10, этой

гранью призму устанавливают на столик перекидного гониометра и наблюдают за положением автоколлимационного блика на сетке зрительной трубы. Блики на сетке должны занимать одинаковое положение. Аналогичным образом иногда подгоняют угол  $90^\circ$  (перед блокировкой призмы для обработки второго катета).

При обработке более точных призм (с допуском на угол в пределах  $1'$ ) зачастую используют стеклянные (шлифованные) наклеенные приспособления, детали на которых фиксируют по жесткому методу.

Для обработки высокоточных призм (с погрешностью углов до  $5''$ ) применяют специальные контактные приспособления (рис. 8.9). Приспособление представляет собой прямоугольную стеклянную пластину 3, углы которой обработаны с погрешностью  $1-2''$ , а ее боковые (базовые) поверхности – с точностью до  $N \leq 1$ .

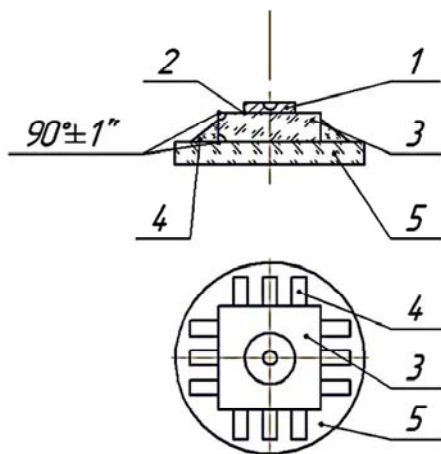


Рис. 8.9. Контактное приспособление для обработки точных призм:  
 1 – nipple; 2 – клей; 3 – пластина; 4 – призма; 5 – пластина

В центре пластины приклеен nipple 1 для передачи движения от пальца поводка штанги станка. Призму 4 предварительно точно отполированной (в металлическом приспособлении или в гипсе) стороной с помощью оптического контакта крепят к боковым поверхностям контактной пластины 3. Чтобы обрабатываемые поверхности призм 4 лежали в одной плоскости с поверхностью

пластины 3, сборку блока производят на точно отполированной пластине 5. Сначала на нее устанавливают контактную пластину 3. При этом сверху должна быть видна интерференционная картина. Затем на пластину 5 помещают призму 4 той стороной, которую в дальнейшем будут обрабатывать. Призму смещают к боковой поверхности пластины 3 и добиваются, чтобы она «села» на оптический контакт. После этого пластину 5 удаляют, а собранный блок направляют на шлифование микропорошком М10, контролируя при этом разнотолщинность контактной пластины 3 (толщина пластины по четырем углам должна быть одинаковой). Затем блок полируют.

Мелкое шлифование и полирование исполнительных поверхностей призм, а также контроль их параметров ( $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$ ) проводят таким же образом, как и в случае плоскопараллельных пластин.

В оптических приборах часто используются призмы с острыми ребрами (например, ребро угла  $90^\circ$  призмы АР-90). В таких случаях призму «сажают» на оптический контакт на контактную пластину, нижняя поверхность которой не имеет фаски (на соответствующем ребре призмы также не должно быть фаски), и обрабатывают такой блок (шлифуют и полируют) до исчезновения выволок и бисера на границе «деталь–приспособление».

#### **8.3.4. Контроль полированных призм**

Окончательный контроль призм включает проверку заданных по чертежу углов, пирамидальности, погрешности  $\delta_{45^\circ}$  и разрешающей способности, которая заменяет контроль  $N$  и  $\Delta N$ .

Значения углов призм измеряют на вертикальном и горизонтальном (типа Г-5) гониометрах. Измерения на вертикальном гониометре производятся по эталонной призме.

На указанных гониометрах могут быть измерены ошибка прямого угла  $\Delta 90^\circ$ , пирамидальность и погрешность  $\delta_{45^\circ}$ . При установке призмы, например АР-90°, на один из катетов (рис. 8.10, а) можно получить значения погрешностей  $\delta_{45^\circ}$  и  $\pi$ .

Для измерения  $\Delta 90^\circ$  призму необходимо установить на боковую грань (рис. 8.10, б). Тогда в поле зрения наблюдаются три основных блика 4, 5, 6, а также блики 5' и 6', пятикратно отраженные внутри призмы. При вращении столика с призмой блики 4', 5' и 6', как



образованные при нечетном числе отражений, будут перемещаться в горизонтальной плоскости, в то время как блики 5 и 6 будут неподвижными.

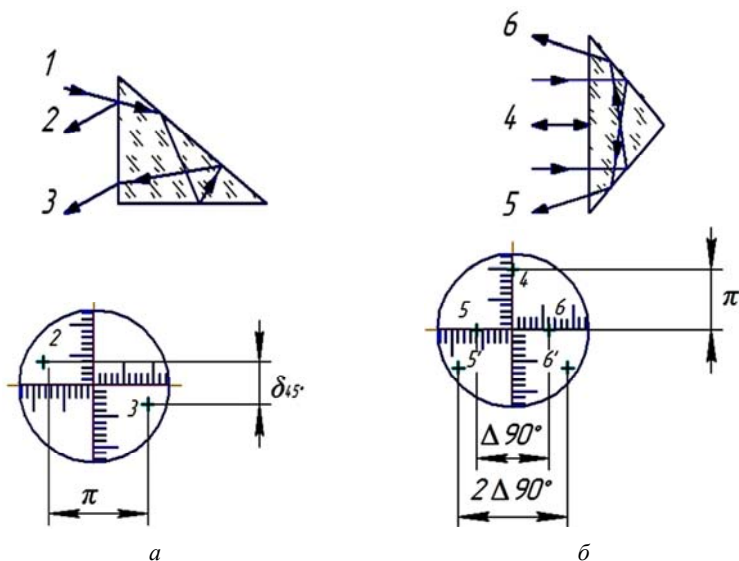


Рис. 8.10. Схема измерения погрешностей симметричных углов, пирамидальности (а) и угла  $\Delta 90^\circ$  (б) призмы:  
 1 – падающий луч; 2 – отраженный; 3 – вышедший из призмы; 4, 5, 6 – блики

В случае контроля крышки крышеобразных призм ошибку угла крышки оценивают по величине двоения изображения перекрестия сетки коллиматора. Призма устанавливается на столик перед объективом коллиматора так, чтобы ход лучей через призму в процессе ее контроля совпадал с ходом лучей при работе призмы в приборе.

Проверка разрешающей способности призм выполняется на установке, приведенной на рис. 8.11. В фокусе объектива 4 коллиматора 3 устанавливается мишень 2, которая подсвечивается источником 1. Рассматривая изображение мишени в зрительную трубу 6, по последнему разрешаемому квадрату определяют разрешающую способность призмы 5. Квадрат считается разрешенным, если в нем можно различить все направления штрихов. Не допускаются двоенные изображения, хвосты, большой фон.

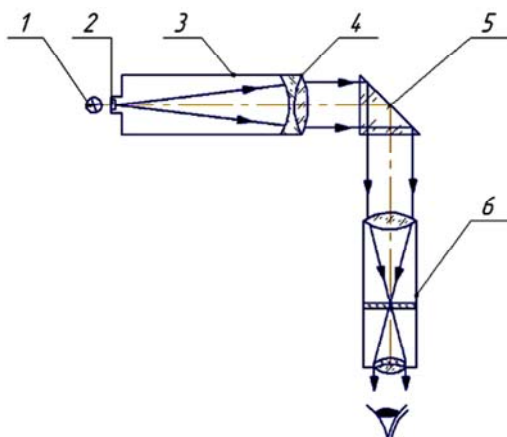


Рис. 8.11. Схема проверки разрешающей способности призмы:  
 1 – источник; 2 – щель; 3 – коллиматор; 4 – объектив;  
 5 – призма; 6 – зрительная труба

Разрешающая способность призмы в тех случаях, когда она не задана в чертежах, но требуется в технологических целях как косвенная оценка точности поверхностей ( $N$  и  $\Delta N$ ), рассчитывается по формуле

$$\varphi'' = K \frac{120''}{\varnothing_{св}},$$

где  $K$  – коэффициент, равный 1,0 для призм с требованиями  $N < 1$ ,  $\Delta N \leq 0,1$ ;  $K = 1,1$  – для призм с  $N = 1-3$ ,  $\Delta N = 0,2-0,5$ ;  $K = 1,2$  – для призм с  $N > 3$ ,  $\Delta N > 0,5$ ;

$\varnothing_{св}$  – световой диаметр (берется из чертежа).

## 8.4. Технология изготовления линз

### 8.4.1. Грубое и среднее шлифование линз

В зависимости от серийности выпуска продукции заготовками для производства линз служат прессовки или куски стекла. Прессовки применяют в массовом и серийном, а куски стекла – при единичном производстве.

Если заготовками для линз являются куски стекла, то на заготовительном участке они проходят ряд дополнительных операций, к которым относятся разметка, распиливание, шлифование сторон, склеивание в столбик, округливание, расклеивание и промывка. Если заготовками являются прессовки, то эти операции не выполняют.

Грубое шлифование (обдирка) линз выполняют поштучно или блоками, причем блоки шлифуют на станках, а одиночки – как на станках, так и вручную.

При шлифовании вручную используют обдирочные станки модели СО и обработку ведут крупнозернистыми порошками в три перехода для крупных деталей из твердого стекла и в два перехода – для мелких деталей из мягкого стекла. Большое значение имеет радиус кривизны шлифовальников, который должен быть строго определенным для каждого номера абразивного порошка. При этом изменение радиуса кривизны шлифовальников по переходам должно быть таким, чтобы обеспечить обработку детали на каждом последующем шлифовальнике, начиная с краевой зоны. Последний переход на данной стадии выполняется микропорошком М28. Обработка каждым номером абразивного порошка должна обеспечивать полное сошлифовывание следов предшествующей обработки и образование матовой поверхности, свойственной применяемому абразивному материалу.

В качестве примера рассмотрим изменение радиуса кривизны комплекта инструмента (чашек) для обработки (шлифования) выпуклой поверхности линзы радиусом  $R_0 = 4,42$  мм (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Комплект инструмента для шлифования выпуклой сферической поверхности  $R_0 = 4,42$  мм

Тип инструмента и радиус кривизны, мм	Марка абразивного материала	Величина изменения радиуса по сравнению с $R_0$ мм	Область применения
1	2	3	4
48,44	M10	0,02	Мелкое и среднее шлифование
48,47	M14	0,05	
48,51	M20	0,09	

1	2	3	4
48,56		0,14	Притирочный инструмент
48,62	M28	0,2	Грубое шлифование (обдирка)
48,82	№ 4	0,4	

Первой обрабатывается поверхность с меньшим радиусом, как имеющая более чистую (глянцевую) поверхность. При этом снимается наименьшая толщина, необходимая для удаления следов прессования (0,3–0,7 мм). Затем обрабатывается сторона с большим радиусом кривизны (шамотная сторона).

Радиус кривизны детали периодически проверяют путем притирки к контрольному инструменту (притиру), а также сферометром или радиусным шаблоном. Ширина кольца притираемой зоны зависит от соотношения между радиусом  $R$  детали и ее диаметром  $D$ :

– при  $R:D < 1$  ширина кольца притираемой зоны детали должна занимать  $1/6D$ ;

– при  $R:D = 1-4$  – третью часть;

– при  $R:D > 4$  – практически всю поверхность детали.

При обработке второй стороны линзы периодически проверяют ее толщину, чтобы не получить тонких деталей. Толщину двояковыпуклых линз проверяют микрометром. Остальные линзы контролируют рычажным или индикаторным толщиномером.

Цилиндрическую поверхность линзы периодически осматривают, и если обнаружится неравномерная толщина по краю, то линзу шлифуют с нажимом на толстый край.

С целью механизации грубого шлифования линз применяют сферошлифовальные станки моделей «Алмаз», АЛ, ШС и др. На этих станках реализуется принцип образования сферы трубчатым (алмазным) инструментом, ось которого проходит через ось вращения детали и наклонена к ней под углом  $\alpha$ . Из рис. 8.12 видно, что угол  $\alpha$  связан со средним диаметром  $d_{cp}$  инструмента и радиусом  $R$  обрабатываемой поверхности соотношением

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

У кольцевых кругов (АК) для обработки выпуклых или вогнутых сферических поверхностей наружный  $D$  и внутренний  $d$  диаметры определяются исходя из диаметра обрабатываемой поверхности  $D_0$  с таким расчетом, чтобы наружная кромка инструмента перекрывала центр заготовки и несколько выходила за ее край для обеспечения свободного выхода СОЖ и продуктов срабатывания (рис. 8.12). При этом используют выражения  $d = KD_0$  (для выпуклой поверхности) и  $D = KD_0$  (для вогнутой поверхности).

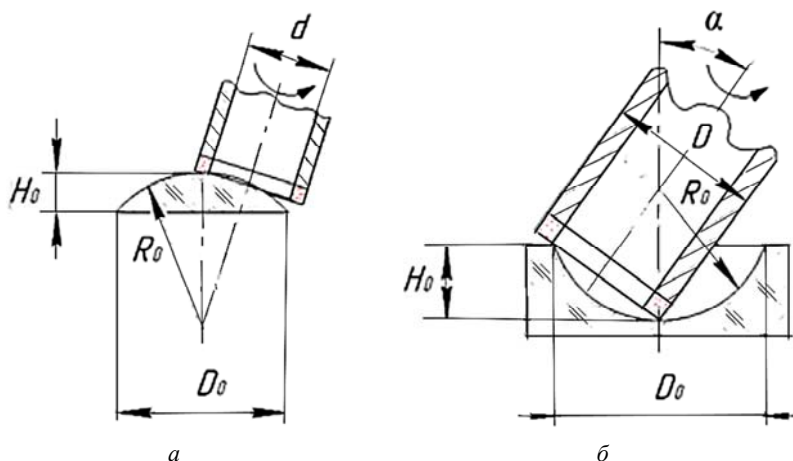


Рис. 8.12. Выбор трубчатого инструмента для обработки выпуклой (а) и вогнутой (б) сферической поверхности

Коэффициент  $K$  выбирают в зависимости от относительной высоты  $H_0 / R_0$  обрабатываемой поверхности:

при  $H_0 / R_0 = 0,8-1; K = 0,8$ ;

при  $H_0 / R_0 = 0,6-0,8; K = 0,7$ ;

при  $H_0 / R_0 = 0,5; K = 0,6$ .

Полученные расчетные значения  $D$  и  $d$  округляют до целого значения по нормальному ряду предпочтительных чисел согласно ГОСТ 6636-69.

После фрезерования линз на станках иногда дополнительно проводят их подшлифовку вручную микропорошком М28.

#### 8.4.2. Мелкое шлифование и полирование линз

Мелкое шлифование первой поверхности блока линз выполняют на станках модели ШП в два перехода водными суспензиями микропорошков или алмазным инструментом. Зернистость микропорошков может быть М28 и М14 или М20 и М10. Алмазный инструмент, который используется на данной операции, представляет собой чашку или гриб с наклеенными по определенному закону алмазоносными таблетками. Алмаз в таблетках может быть самых разных фракций.

Радиус кривизны поверхности блока после первого перехода контролируют по ширине зоны ее контакта (притирке) с поверхностью инструмента (шлифовальника) для второго перехода. После выполнения второго перехода радиус поверхности контролируют пробным стеклом по влаге или предварительно наносят на деталь тонкий слой воска (восковым карандашом наносят несколько мазков по поверхности детали, которые затем растирают салфеткой), накладывают пробное стекло и смотрят «цвет».

По окончании шлифования кривизна поверхности детали должна отличаться от заданной в среднем на два кольца. Так как обработку (шлифование и полирование) всегда начинают с краевой зоны, то очевидно, что при контроле всегда должна быть «яма». При шлифовании необходимо также добиваться максимального уменьшения местных ошибок ( $\Delta N$ ). При значительном отступлении от заданного радиуса кривизны (приблизительно три-четыре кольца) целесообразно перешлифовать поверхность заново.

Полирование ведут на тех же станках (модели ШП) водной суспензией полирита с применением смоляных полировальников. Марку полировочной смолы выбирают в зависимости от интенсивности процесса и температуры воздуха. Проконтролировав качество полированной поверхности (формы – с помощью РПС, чистоты – с помощью лупы  $3^x$ ), ее защищают лаком и блок направляют на разблокировку. (Поскольку при контроле с помощью РПС на линзу наносятся царапины, то на блок стараются наклеить заведомо бракованную деталь, по которой и контролируют «цвет». Если же такой линзы нет, то контроль кривизны проводят по одной и той же линзе на блоке). Разблокировку выполняют охлаждением блока в холодильных камерах с последующим съемом деталей с помощью деревянного молотка или ультразвука (сухая разблокировка).

После контроля толщины деталей их снова направляют на блокировку для последующего мелкого шлифования и полирования второй поверхности, которые выполняются на том же оборудовании.

Полностью обработав и разблокировав линзы, осуществляют их промывку. Эту операцию выполняют вручную с помощью бензина (растворяют смолу) и ацетона (растворяют лак) протиркой салфетками или же на ультразвуковых установках без применения ЛВЖ и протирки. Промывку наклеечных приспособлений проводят на специальном агрегате, который представляет собой четырехпозиционную установку карусельного типа. На крестовине установки закреплены четыре металлические корзины, в которые на первой позиции загружаются приспособления. На второй позиции происходит разогрев приспособлений в электропечи до температуры 250–400 °С. На третьей и четвертой позициях выполняют горячую предварительную (в растворе щелочи) и окончательную (в воде) промывку приспособлений.

### 8.4.3. Центрирование линз

*Центрирование линз* – это операция по совмещению геометрической и оптической осей линзы.

Операцию центрирования линз выполняют в два перехода:

- 1) совмещение оптической оси линзы с осью вращения шпинделя станка;
- 2) шлифование цилиндрической поверхности линзы до ее заданного диаметра.

При центрировании совмещение оптической оси линзы с осью вращения шпинделя станка выполняют двумя способами: по прибору и в самоцентрирующих патронах. Центрирование крупногабаритных линз производят в процессе их шлифования путем подгонки разнотолщинности (косины)  $\Delta t$  до допустимой чертежом величины. Пересчет на разнотолщинность линз по краю производят по одной из формул:

$$\Delta t = CD \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \quad \text{или} \quad \Delta t = \frac{CD}{f'(n-1)},$$

где  $C$  – минимальный допуск на центрирование, заданный чертежом, мм;

$D$  – диаметр линзы, по которому измеряется разнотолщинность;

$R_1$  и  $R_2$  – абсолютные значения радиусов кривизны;

$f'$  – фокусное расстояние линзы;

$n$  – показатель преломления стекла.

Установку линз по прибору (по микроскопу) применяют для деталей с большими радиусами кривизны.

Точность центрирования – порядка 10 мкм.

Схема установки линзы по прибору показана на рис. 8.13.

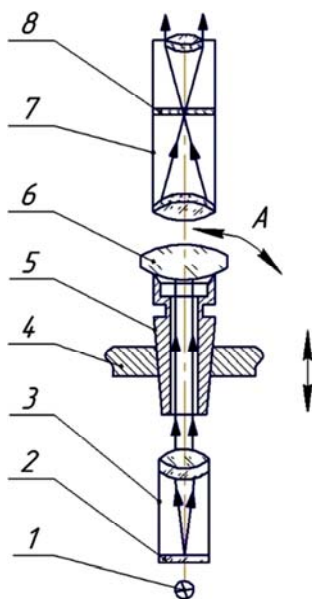


Рис. 8.13. Схема установки линз по прибору:

1 – источник; 2 – сетка; 3 – коллиматор; 4 – столик; 5 – оправка;

6 – линза; 7 – микроскоп; 8 – сетка

Предварительно на патрон 5 смолой наклеивают линзу 6 (линзы диаметром до 40 мм нагревают на электроплитке, а большего диаметра – в термостате; линзы нагревают до 50–60 °С; оправки нагревают на спиртовой или газовой горелке) и устанавливают его в посадочное отверстие стола 4 прибора. Подогревая смолу до размягчения,



линзу передвигают по оправке 5 (по направлению стрелки А) и добиваются такого ее положения, когда при включенном источнике света 1 изображение сетки 2 коллиматора 3 совпадает с центром сетки 8 микроскопа 7 или попадает между допусковых штрихов на этой сетке. При вращении оправки 5 в гнезде стола 4 изображение сетки 2 не должно выходить за допусковое поле. Затем оправку 5 с линзой снимают с прибора и после остывания смолы (через 5–10 мин) повторно проверяют центровку. Отцентрированную таким образом линзу и патрон устанавливают в зажиме шпинделя центрировочного станка, на котором округливают линзу. Для этого применяют станки с ручной подачей инструмента.

Установку линз в самоцентрирующих патронах осуществляют непосредственно на специальных станках модели ЦС, работающих с алмазным шлифовальным кругом в полуавтоматическом цикле. Центрируемую линзу 1 (рис. 8.14) зажимают в шпинделях станка, левый из которых является ведущим, а правый имеет осевое перемещение по стрелке А, и с помощью пружины прижимают линзу к левому шпинделю. На шпинделях закреплены стальные закаленные цилиндрические патроны 2 и 3, имеющие тонкие полированные рабочие кромки. Оси кромок патронов совпадают с осью вращения шпинделей. Биение кромок не должно превышать 1–2 мкм. Оба патрона вращаются в одну сторону.

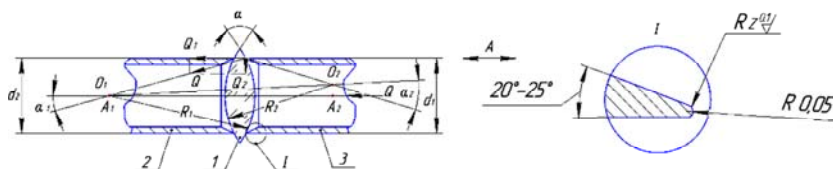


Рис. 8.14. Схема центрирования линз в самоцентрирующих патронах:  
1 – линза; 2, 3 – патроны

В начальном положении оптическая ось линзы  $O_1O_2$  может быть смещенной относительно геометрической оси  $A_1A_2$  патронов 2 и 3. Однако при зажиме шпинделей с силой  $Q$  на линзу будет действовать сила  $Q_2$ , сдвигающая ее к оси вращения шпинделей до тех пор, пока деталь не коснется всей кольцевой поверхности патронов. Это произойдет автоматически в момент совмещения оптической оси линзы с осью шпинделей. Величина силы  $Q_2$  зависит от кривизны

поверхности линзы, характеризуемой углом сдвигания (зажима)  $\alpha$ , образованным касательными к сферическим поверхностям в точке их контакта с патронами:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = \arcsin \frac{d_1}{2R_1} + \arcsin \frac{d_2}{2R_2}.$$

Опытным путем установлено, что линзы с углом зажима  $\alpha \geq 45^\circ$  хорошо устанавливаются и центрируются с точностью до 0,005 мм. Линзы с углом зажима  $45^\circ > \alpha > 25^\circ$  устанавливаются хуже и центрируются с меньшей точностью. Линзы с  $\alpha < 20^\circ$  этим способом не центрируют.

После центрирования линзы направляют на фасетирование, промывку, просветление и склеивание.

*Фасетирование линз.* Фаски на линзах по их назначению разделяют на технологические и конструктивные. Технологические предназначены для предохранения краев линзы от выколов во время обработки линзы. На чертеже готовой детали указывают только конструктивные фаски, а технологические фаски проставляют в технологических картах.

Технологические фаски наносят после грубого шлифования линз. В процессе дальнейшего шлифования они уменьшаются, а после центрирования полностью срезаются. Поэтому все виды конструктивных фасок наносят после центрирования линзы. В крупносерийном и массовом производстве линз операцию фасетирования иногда совмещают с центрированием, которое выполняют комбинированной фрезой на центрировочном станке. Поэтому режущая кромка фрезы имеет цилиндрическую и коническую части.

## 8.5. Контроль линз

### 8.5.1. Контроль формы поверхности контактными методами

Наиболее распространенный способ контроля формы оптических поверхностей состоит в измерении радиусов кривизны. Контроль чаще всего осуществляют контактными методами при помощи кольцевых сферометров и пробных стекол. В первом случае на диаметре  $d$

измеряют стрелку прогиба  $h$  (рис. 8.15) и сравнивают ее с расчетным значением  $h_0$ , которое определяют по формуле

$$h_0 = R_0 - \sqrt{R_0^2 - \frac{d^2}{4}},$$

где  $R_0$  – заданный радиус контролируемой сферической поверхности.

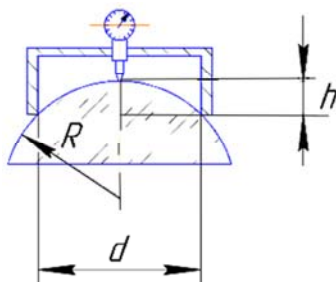


Рис. 8.15. Контроль радиуса кривизны с помощью кольцевого сферометра

Контроль при помощи сферометра имеет следующие недостатки:

- 1) опасность повреждения исследуемой поверхности;
- 2) возникновение погрешностей измерений в результате механических и тепловых деформаций деталей сферометра;
- 3) затруднения при определении ошибок, связанных с отклонением формы детали от сферической, и невозможность выявить локальные погрешности.

Преодоление последнего недостатка при одновременном повышении точности контроля достигается применением пробных стекол.

К недостаткам метода пробного стекла следует отнести:

- 1) опасность повреждения исследуемой поверхности при сопряжении с пробным стеклом;
- 2) погрешности, обусловленные неравномерным давлением и температурой, а также случайным попаданием пыли (загрязнений);
- 3) затруднения при сопряжении с пробным стеклом и наблюдении интерференционной картины в случае контроля микрооптики диаметром 1–3 мм;
- 4) необходимость содержания большого количества пробных стекол, зачастую равного утроенному числу радиусов кривизны;

5) затруднения при контроле поверхностей линз, завальцованных в оправы, т. е. на этапе, когда особенно важно выявить наличие возможных искажений оптических поверхностей напряжениями, возникшими при завальцовке;

6) невозможность контроля возникающих в склейке искажений оптических поверхностей;

7) погрешности контроля крутых сферических поверхностей, возникающие вследствие того, что разные участки поверхности наблюдаются под разными углами.

Появление последней погрешности рассмотрим на примере контроля плоской оптической детали пробным стеклом (рис. 8.16).

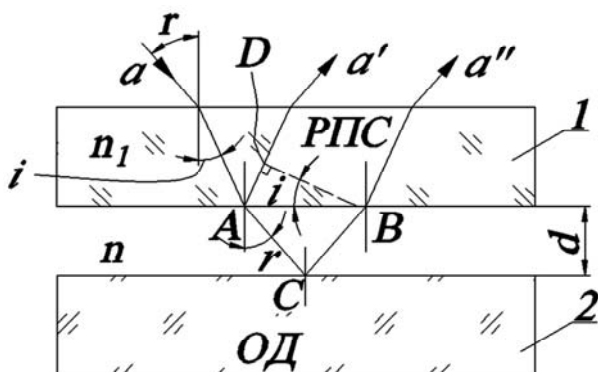


Рис. 8.16. К контролю формы поверхности пробным стеклом:  
1 – пробное стекло; 2 – деталь

При сопряжении пробного стекла 1 с деталью 2 между ними возникает воздушный промежуток толщиной  $d$ . Тогда разность хода  $\Delta$  для интерферирующих лучей  $a'-a''$  будет

$$\Delta = (AC + BC)n - ADn_1 + \lambda / 2, \quad (8.1)$$

где  $n$  и  $n_1$  – показатели преломления воздуха и стекла соответственно;

$\lambda/2$  – слагаемое из-за скачка фазы при отражении излучения от границы «воздух–стекло» (в ряде случаев при использовании интерференционной картины для измерительных целей это слагаемое не учитывают).

Из рис. 8.16 видно, что  $AC = CB = d / \cos r$ ,  $AD = AB \sin i$ ,  $AB = 2d \operatorname{tgr}$ . Тогда  $AD = 2d \operatorname{tgr} \cdot \sin i$ . С учетом этих значений выражение (8.1) запишется как

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{2dn}{\cos r} - 2dn_1 \operatorname{tgr} \cdot \sin i = \frac{2dn}{\cos r} - 2dn_1 \frac{\sin^2 r \sin i}{\cos r \sin r} = \\ &= \frac{2d}{\cos r(1 - \sin^2 r)} = \frac{2d}{\cos r} \cos^2 r = 2d \cos r. \end{aligned} \quad (8.2)$$

Из соотношения (8.2) видно, что при изменении угла  $r$  изменяется разность хода  $\Delta$  интерферирующих лучей и, следовательно, изменяется количество интерференционных колец (одному интерференционному кольцу соответствует  $\Delta = \lambda / 2$ ). Это значит, что для правильного определения количества интерференционных колец наблюдение необходимо проводить перпендикулярно воздушному промежутку, что особенно актуально при контроле линз с крутым радиусом. В ряде случаев проверку таких поверхностей следует проводить по частям.

### **8.5.2. Контроль формы поверхности бесконтактными методами**

#### **А. Интерферометр с дифрагированной эталонной волной**

Схема интерферометра с дифрагированной эталонной волной показана на рис. 8.17.

Интерферометр работает следующим образом. Пучок лучей от источника 1, прошедший через расширительный элемент 2, фокусируется в виде пятна рассеяния диаметром около 100 мкм на точечном отверстии 4 диаметром примерно 10 мкм в зеркальном покрытии наклонного зеркала 5. Точечное отверстие становится источником дифрагированной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности 6 изображается в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие 4. Отразившись от зеркала 5, эта рабочая волна направляется в сторону наблюдателя.

Часть излучения источника, сфокусированного объективом 3 на точечное отверстие, но не прошедшего через него, отражается от зеркала 5 в направлении сферического зеркала 7 и, отразившись от него, фокусируется на отверстии 4. При этом на отверстии формируется

вторая дифрагированная сферическая волна, которая используется в качестве опорной. В результате сложения этой волны с рабочей возникает интерференция, несущая информацию о форме контролируемой поверхности 6. Особенность рассмотренного варианта схемы интерферометра состоит в том, что он является полностью безэталонным, так как в нем не содержится ни одной эталонной оптической поверхности, а также отсутствуют поверхности, погрешности изготовления которых входят в погрешности измерения.

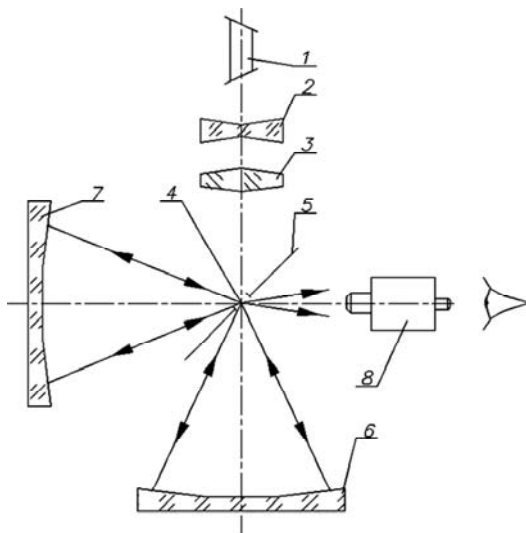


Рис. 8.17. Оптическая схема интерферометра с дифрагированной эталонной волной:

- 1 – источник; 2 – расширитель; 3 – объектив; 4 – точечная диафрагма;  
5 – зеркало; 6 – контролируемая поверхность; 7 – зеркало;  
8 – приемная оптическая система

При наличии в схеме контроля значительных вибраций используют телевизионную систему. Для устранения влияния вибраций наблюдают и расшифровывают изображение неподвижной интерферограммы, воспроизводимое с одиночного кадра.

### **Б. Интерферометр с эталонной фронтальной поверхностью**

Схема интерферометра показана на рис. 8.18. При использовании интерферометра необходимо обеспечить интерференцию лучей, отраженных от эталонной поверхности А элемента 7 и контролируемой

поверхности Б линзы 8. Для этого в пространстве между объективом 6 и элементом 7 должно произойти наложение упомянутых лучей, что возможно в случае, когда они идут по одному и тому же следу. Данное требование реализуется только для лучей, падающих на поверхности А и Б по нормальям. Следовательно, необходимо определенное расположение элемента 7 относительно объектива 6 и контролируемой детали 8 относительно элемента 7. Для выяснения этого расположения проанализируем схему интерферометра.

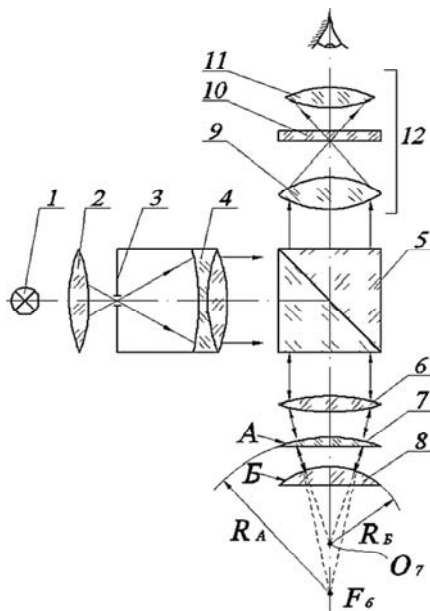


Рис. 8.18. Оптическая схема интерферометра с эталонной фронтальной поверхностью:

- 1 – источник; 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4 – объектив коллиматора;
- 5 – призма-куб; 6 – объектив; 7 – эталонная сферическая поверхность;
- 8 – контролируемая деталь; 9 – объектив; 10 – сетка;
- 11 – окуляр; 12 – зрительная труба

Пучок лучей от источника 1 после конденсора 2 проходит точечную диафрагму 3 и параллельным пучком выходит объектива 4 коллиматора. Отразившись от полупрозрачной грани призмы-куба 5, излучение направляется в объектив 6 и собирается в его фокусе, с которым совмещен центр кривизны эталонной сферической

поверхности радиусом  $R_A$  стекла 7. При этом деталь 8 устанавливают так, чтобы центр кривизны контролируемой ее сферической поверхности Б радиусом  $R_B$  совпадал с точкой  $O_7$  фокусирования лучей стеклом 7. Лучи, отраженные от эталонной поверхности стекла 7 и от контролируемой детали, интерферируют между собой. Объективом 9 эта интерференционная картина проецируется в плоскость сетки 10 и рассматривается через окуляр 11 зрительной трубы 12.

### 8.5.3. Контроль центровки

Для проверки точности центровки линз наибольшее распространение получили оптические приборы двух типов:

1) коллимационные приборы, работающие по принципу измерения биения изображения светящейся марки, образованной лучами, прошедшими через вращаемую деталь;

2) автоколлимационные приборы, позволяющие измерять биение изображения светящейся марки, образованной лучами, отраженными от вращаемой детали.

Оптическая схема коллимационного прибора изображена на рис. 8.19.

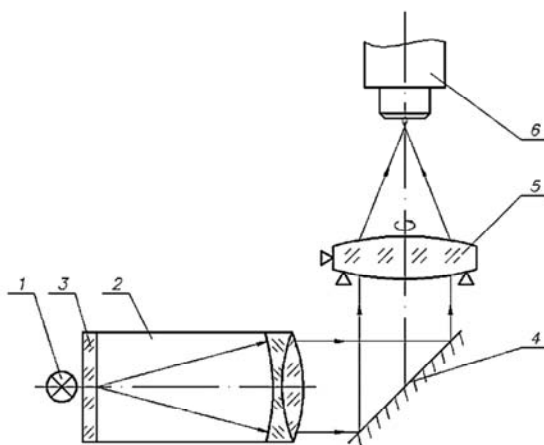


Рис. 8.19. Оптическая схема коллимационного прибора для контроля центровки линз:

1 – источник; 2 – коллиматор; 3 – сетка; 4 – зеркало;  
5 – контролируемая линза; 6 – микроскоп



Излучение от источника света *1* проходит через коллиматор *2*, в фокальной плоскости которого установлена сетка *3* в виде перекрестия, и после отражения от зеркала *4* параллельным пучком попадает на контролируемую линзу *5*. Диаметр окружности, описываемой изображением перекрестия коллиматора при вращении линзы *5*, представляет собой удвоенную децентрировку, которую наблюдают через микроскоп *6*.

## 8.6. Соединение оптических деталей

### 8.6.1. Склеивание

Общими требованиями, которые предъявляются к неразъемному соединению оптических деталей, являются сохранение оптических свойств деталей, минимальные деформации поверхностей после соединения, обеспечение необходимой механической прочности, термо- и влагостойкости, химической стойкости. При выборе клеящего вещества и проведения техпроцесса склеивания необходимо учитывать, что затверждение клея, сопровождающееся усадкой, не вызывает деформации или искажения склеиваемых деталей в том случае, если затверждение протекает при постоянной или медленно изменяющейся температуре. Склеивание деталей без деформаций возможно проводить также и клеем, отвердевающим при комнатной температуре.

Техпроцессу склеивания линз предшествует их попарная комплектация по *N* и по толщинам с учетом толщины слоя клея. Толщину клея не контролируют, а обеспечивают в пределах 0,005–0,015 мм.

Комплектация линз снижает суммарную погрешность толщин склеиваемых линз и тем самым обеспечивает получение заданных значений фокусных отрезков и качества изображения.

Соединяемые поверхности попарно скомплектованных линз чистят, удаляют пыль и ворсинки, накладывают одну на другую, осматривают в проходящем свете и комплектами устанавливают на выставленную по горизонтали плоскость. Если применяемый клей требует нагрева деталей, то последние устанавливают парами на электроплиту или в термостат, а клей нагревают в пробирке, которую помещают в глицериновую ванну, нагретую до определенной температуры. Перед склеиванием положительную линзу снимают

с отрицательной, на поверхность наносят каплю клея и накладывают на нее положительную линзу. Затем линзы переносят на чистый черный бархат и деревянной рукояткой с пробковым наконечником накладывают на верхнюю линзу, которую при этом слегка вращают и перемещают, удаляя пузырьки воздуха и избыток клея. Склеенные линзы устанавливают на прибор для проверки центрирования линз и перемещением положительной линзы по отрицательной добиваются совмещения их оптических осей (предварительное центрирование). После этого детали устанавливают на электроплиту, где выдерживают 10–15 мин при температуре 80–90 °С, и повторно просматривают на приборе, устраняя децентрировку линз (окончательное центрирование). Излишки клея с цилиндрической поверхности склеенных линз удаляют лезвием и протирают салфеткой, смоченной органическим растворителем.

Центрированные линзы помещают в термостат для полимеризации (затвердевания) клея, где их выдерживают в течение 8–10 ч при температуре 50–55 °С.

Трехлинзовые сборки склеивают в два приема. Вначале склеивают две линзы, а после полной полимеризации клея и подготовки склеиваемых поверхностей приклеивают третью линзу.

Расклеить линзы до наступления полной полимеризации клея можно путем их нагрева до 100–140 °С. После полной полимеризации клея линзы расклеивают нагревом в глицериновой ванне при температуре 230–240 °С в течение нескольких часов. Однако такое разъединение связано с риском порчи деталей, особенно сделанных из флинтových стекол. Механическую расклейку ножом из мягкой стали применяют для линз из прочного стекла и с тупыми фасками, но при этом на отрицательных линзах могут образоваться выколки. Применяется также термический способ разъединения, при котором склеенные линзы быстро охлаждают, помещая их в жидкий азот. В результате разницы ТКЛР происходит разъединение деталей. Такое связано с риском порчи деталей.

Имеются клеи, которыми склеивают оптические детали непосредственно при комнатной температуре, но после этого для ускорения полимеризации предварительно отцентрированные линзы нагревают до 70–90 °С и выдерживают в течение 10–15 мин. Во время полимеризации производят контроль центрирования. Клей полностью полимеризуется в течение 24–48 ч при комнатной температуре.

Призмы и пластины склеивают так же, как и линзы. При этом призмы склеивают в приспособлении, позволяющем установить их в нужном положении. Проверка правильности склейки производится на специальных контрольно-юстированных (КЮ) приборах. Полимеризацию клеящего слоя осуществляют в этом же приспособлении.

Если по ТУ требуется защита клеевых соединений от атмосферного воздействия, то место склейки таких деталей по периметру защищают клеем ОК-46 или акриловым. Для гашения бликов и отраженных лучей на нерабочие поверхности наносят черный матовый лак.

Нарушение технологического процесса склеивания может привести к расклейкам в виде звездочек, пузырьков, точек, трещин, пятен, дубовых листочков и к нарушению чистоты клеевого соединения в виде пылинок и ворсинок. Расклейки появляются из-за плохой чистоты клеевого соединения, а также воздействий механических усилий, промывочных жидкостей, перепадов температур и других факторов.

Для контроля чистоты клеевого соединения и обнаружения расклеек детали подсвечивают в торец и просматривают невооруженным глазом или с помощью лупы  $6^x$  на темном фоне.

Из-за натяжений в клеящем слое или нарушений режимов сушки могут возникать дефекты формы поверхностей, которые контролируются с помощью пробного стекла или по разрешающей способности (при наличии дефектов формы поверхностей разрешающая способность блока ухудшается).

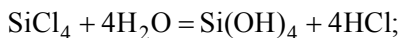
### ***8.6.2. Соединение методом глубокого оптического контакта***

Соединение оптических деталей под действием сил молекулярного сцепления, упрочнения термической обработкой или облучением инфракрасными (ИК) лучами называют *глубоким оптическим контактом* (ГОК). ГОК – неразъемное соединение, прочность которого близка к прочности материалов самих оптических деталей.

Технологический процесс соединения методом ГОК сводится к следующему.

Сначала на контактируемую поверхность одной из соединяемых деталей наносят пленку двуокиси кремния толщиной 130–150 нм. Пленка в зависимости от материала соединяемых деталей образуется

или травлением в азотной кислоте, или гидролизом паров четыреххлористого кремния. Сущность последнего метода заключается в том, что в присутствии влажного воздуха пары четыреххлористого кремния ( $\text{SiCl}_4$ ) гидролизуются, образуя ортокремниевую кислоту в дисперсном состоянии. Постепенно отдавая воду и адсорбируясь на поверхности детали, они образуют прозрачный слой двуокиси кремния. Уравнение реакции можно записать в следующем виде:



Осажденную пленку сушат при температуре  $100^\circ\text{C}$  в течение 0,5 ч или в этиловом спирте в течение 10–15 мин и детали соединяют методом оптического контакта по обычной технологии. Для упрочнения оптического контакта до монолита соединенный узел подвергают термической обработке при температуре  $250^\circ\text{C}$  в течение 8 ч или облучают инфракрасными излучателями с последующим охлаждением блока (вместе с печью).

Поверхности деталей, подлежащие соединению ГОК, должны быть изготовлены с точностью  $N \leq 0,5$ ,  $N \leq 0,1$ . Допускается обработка соединяемых поверхностей деталей с  $N > 0,5$ , но противоположными по знаку значениями. Метод ГОК – трудоемкий.

## Глава 9. ИЗГОТОВЛЕНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

Оптические детали с асферической поверхностью (АП) по виду уравнения АП и ее знаку бывают: выпуклые и вогнутые параболоиды  $y^2 = 2px$ ; эллипсоиды  $y^2 = 2px - qx^2$ ; гиперболоиды  $y^2 = 2px + qx^2$  (поверхности второго порядка), асфероиды (поверхности высших порядков), знакопеременные поверхности типа Шмидта (поверхности с точками перегиба), цилиндры, конусы, торы и др. При отсутствии уравнения поверхности АП задают соответствующим координатами точек.

### 9.1. Способы формообразования асферических оптических деталей

#### 9.1.1. Вакуумное моллирование

В процессе вакуумного моллирования круглые заготовки 1 (рис. 9.1) из полированного стекла нагревают в форме 2, имеющей профиль необходимой асферической поверхности (АП), до температуры начала пластической деформации. После создания вакуума под заготовкой она просаживается в форму 2 под действием избыточного давления  $\Delta p$ , принимая ее конфигурацию.

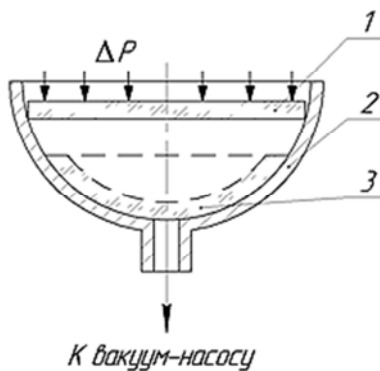


Рис. 9.1. Схема вакуумного моллирования асферических деталей:  
1 – заготовка; 2 – форма; 3 – деталь

Нагрев заготовки 1 до температуры начала пластической деформации стекла позволяет получить деталь 3, на поверхности которой не отпечатываются микронеровности рабочей поверхности инструмента 2. Такая деталь не требует дальнейшей механической обработки.

Вакуумным моллированием изготавливают оптические детали, имеющие АП невысокой точности.

### ***9.1.2. Вакуумная асферизация***

Данный метод применяется для получения АП с малым отступлением от ближайшей сферы или плоскости. Метод основан на нанесении на исходную сферическую или плоскую полированную поверхность подложки асферизирующего слоя неодинаковой толщины. Этим способом можно изготавливать поверхности любого порядка, но максимальная толщина наносимого слоя не может быть больше 10–15 мкм, так как прочность сцепления слоя со стеклом резко уменьшается с увеличением толщины асферизирующего слоя.

Для образования АП на стеклянной подложке используют испаритель и маску, расположенную между ним и подложкой, асферизирующие слои (моноокись кремния, сернистый цинк и др.) наносят в вакуумной установке на вращающуюся с небольшой скоростью подложку.

Геометрию фасонных вырезов маски (рис. 9.2) рассчитывают в зависимости от требуемого распределения толщины асферизирующего вещества по круговым зонам подложки. Маску изготавливают фотогальваническим способом из латунной фольги толщиной порядка 0,05 мм. Деталь (или маска) вращается, и за счет фасонного выреза обеспечивается изменение толщины наносимого слоя по зонам АП. В процессе испарения толщину слоя косвенно контролируют фотометрическим устройством. Погрешность  $t$  наносимого слоя составляет в среднем 0,1 мкм.

На точность и воспроизводимость вакуумной асферизации большое влияние оказывают соосность вращаемой заготовки, маски и испарителя, а также симметричность молекулярного пучка в пределах необходимого телесного угла. Последнее обеспечивается покрытием испарителя диафрагмой с круглым отверстием диаметром около 10 мм.

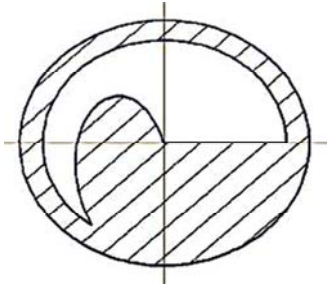


Рис. 9.2. Маска для вакуумной асферизации

### 9.1.3. *Обработка способом линейного соприкосновения (обработка ножевым инструментом)*

Обработку ножевым инструментом применяют для получения выпуклых и вогнутых АП второго порядка. Схема обработки параболической поверхности изображена на рис. 9.3. Здесь заготовка 1, наклеенная на наклейное приспособление 4 и первоначально имеющая сферическую поверхность, вращается вокруг оси. Инструмент (нож) 2, представляющий собой тонкую пластинку из стали, латуни или оргстекла, перемещается возвратно-поступательно параллельно самому себе и оси вращения заготовки. Соприкосновение заготовки и инструмента происходит по линии. Для сохранения первоначального профиля ножа 2 применяется сменная металлическая лента 3.

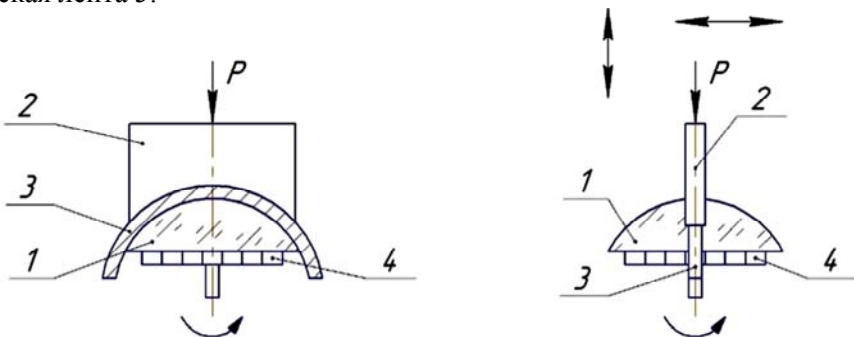


Рис. 9.3. Асферизация деталей ножевым инструментом:  
1 – заготовка; 2 – инструмент; 3 – лента металлическая;  
4 – наклейное приспособление

Шлифование выполняют свободным абразивом. Полирование производят на том же оборудовании ножевым инструментом, обтянутым пропитанным смолой сукном.

## 9.2. Контроль асферических поверхностей

### 9.2.1. Контактные методы

Главное достоинство контактных методов заключается в том, что они применимы как для полированных, так и для шлифованных поверхностей, и их можно использовать непосредственно на рабочем месте. Однако эти методы имеют сравнительно невысокую точность. Они позволяют проверить поверхность в отдельных точках или зонах, т. е. относятся к дискретным методам, причем контакт измерительного инструмента с контактируемой поверхностью не исключает возможности повреждения последней.

Одним из контактных методов является измерение с помощью сферометров (рис. 9.4). В данном случае для ряда сечений с заранее выбранными координатами  $y_i$  измеряют стрелки прогиба  $z_i$  и сравнивают их с расчетными значениями. Для контроля одной поверхности необходимо иметь набор, состоящий, как правило, из 4–12 колец.

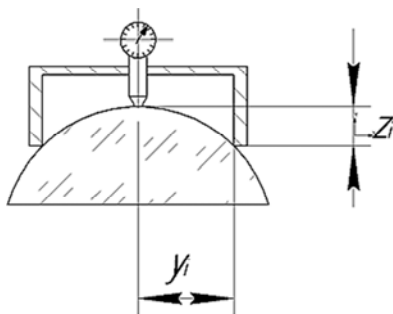


Рис. 9.4. Контроль асферической поверхности с помощью сферометра

Для контроля асферических поверхностей, мало отличающихся от сферы или плоскости, используют сферические или плоские пробные стекла (рис. 9.5). Последние накладывают на контролируемую поверхность и наблюдают интерференционную картину.



Профиль асферической поверхности определяют по толщине воздушного промежутка, исходя из формулы

$$t = N\lambda / 2,$$

где  $N$  – число интерференционных колец, наблюдаемых на участке  $y$ ;

$\lambda$  – длина волны источника света, используемого в процессе измерений.

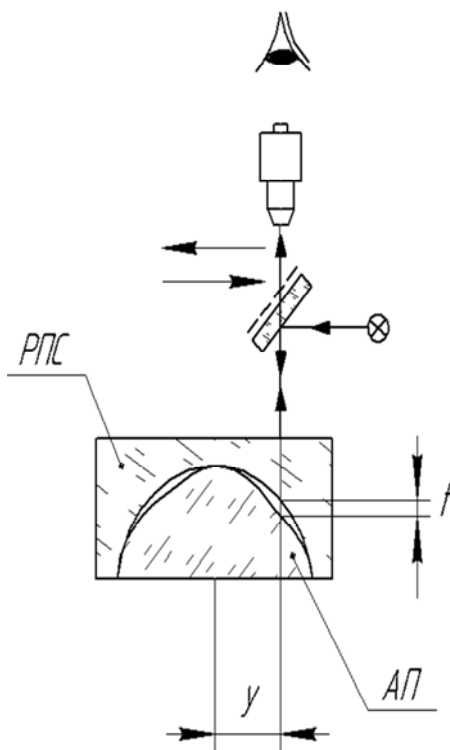


Рис. 9.5. Контроль асферической поверхности с помощью пробного стекла

Определение величин  $y$  и  $N$  проводят на измерительном микроскопе типа УИМ.

Необходимое условие правильного наложения РПС на контролируемую АП – расположение центра кривизны сферической

поверхности на оси симметрии АП. Признаком выполнения этого условия является симметричность интерференционных колец, т. е. одинаковое их число слева и справа от вершины в любом меридиональном сечении.

### 9.2.2. Компенсационный (бесконтактный) метод

Сущность метода заключается в том, что вся совокупность лучей, выходящих из дополнительной оптической системы (компенсатора), полностью совпадает с нормальными к контролируемой АП.

Пусть на линзу *1* (рис. 9.6), выполняющую роль компенсатора, падает параллельный пучок лучей. Параметры компенсатора рассчитаны таким образом, что любой луч, выходящий из него, падает нормально к АП *2* и после отражения от нее повторяет свой путь в обратном направлении. Следовательно, компенсатор преобразует падающий на него плоский или сферический волновой фронт в асферический, совпадающий с теоретической формой контролируемой АП. Это значит, что волновой фронт, выходящий из компенсатора, служит своеобразным пробным стеклом, налагаемым на контролируемую АП.

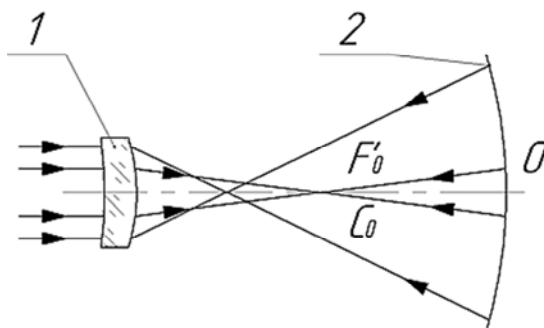


Рис. 9.6. Контроль асферической поверхности компенсационным методом:  
*1* – компенсатор; *2* – контролируемая АП

Одним из наиболее простых интерферометров, в котором для контроля АП используется компенсатор, является интерферометр Тваймана-Грина (рис. 9.7), в котором компенсатор *1* преобразует плоский волновой фронт, выходящий из интерферометра, в волновой фронт,

совпадающий с расчетным профилем контролируемой АП 2, и, следовательно, все лучи направлены по нормали к последней.

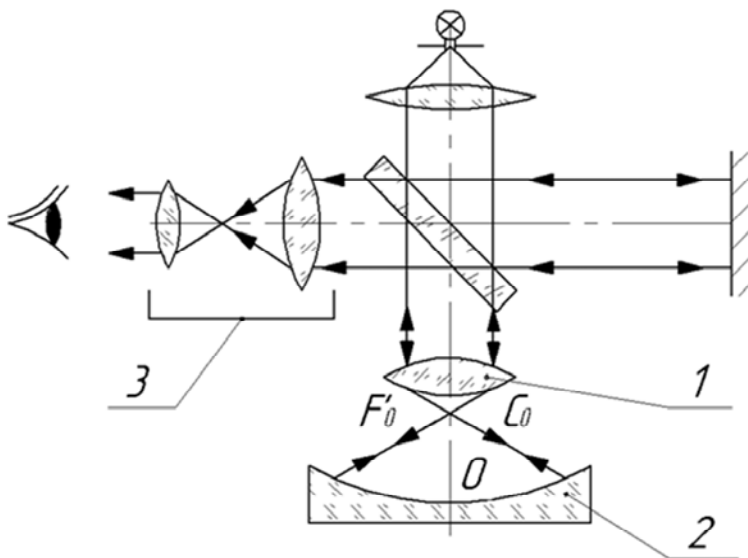


Рис. 9.7. Контроль асферической поверхности  
на интерферометре Тваймана-Грина:  
1 – компенсатор; 2 – контролируемая АП; 3 – зрительная труба

При прохождении лучей через зрительную трубу 3 будут наблюдаться интерференционные кольца или полосы, по которым легко определить погрешность изготовления АП.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. – М. : Высшая школа, 1963. – 519 с.
2. Винокуров, В. М. Исследование процесса полировки стекла / В. М. Винокуров. – Л. : Машиностроение, 1967. – 196 с.
3. Заказнов, Н. П. Изготовление асферической оптики / Н. П. Заказнов, В. В. Горелик. – М. : Машиностроение, 1978. – 246 с.
4. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
5. Креопалова, Г. В. Оптические измерения / Г. В. Креопалова, Н. Л. Лазарева, Д. Т. Пуряев. – М. : Машиностроение, 1987. – 254 с.
6. Кривовяз, Л. М. Практика оптической измерительной лаборатории / Л. М. Кривовяз, Д. Т. Пуряев, М. А. Знаменская. – М. : Машиностроение, 1982. – 333 с.
7. Оптический производственный контроль / под ред. Д. Малакеры. – М. : Машиностроение, 1985. – 400 с.
8. Пуряев, Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей / Д. Т. Пуряев. – М. : Машиностроение, 1976. – 262 с.
9. Технология оптических деталей / М. Н. Семибратов [и др.]. – М. : Машиностроение, 1978. – 415 с.
10. Справочник технолога-оптика / под ред. М. А. Окатова. – СПб. : Политехникае, 2004. – 679 с.
11. Сулим, А. В. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. – М. : Высшая школа, 1975. – 315 с.
12. Технология СБИС. – М. : Мир, 1986. – 404 с.
13. Федотов, А. И. Технология автоматизированного нанесения штрихов и знаков / А. И. Федотов. – Л. : Машиностроение, 1977. – 302 с.
14. Козерук, А. С. Технология оптического приборостроения : учебное пособие для студентов вузов по специальностям «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы», «Механические и электромеханические приборы и аппараты» / А. С. Козерук; Белорусский национальный технический университет, Кафедра «Лазерная техника и технология». – Минск : БНТУ, 2016. – 504 с.

Учебное издание

**КОЗЕРУК Альбин Степанович**  
**КУЗНЕЧИК Валерия Ольгердовна**

## **ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ**

Учебно-методическое пособие  
для студентов специальности 1-38 01 02  
«Оптико-электронные и лазерные приборы и системы»

Редактор *Н. А. Костешева*  
Компьютерная верстка *Е. А. Беспанской*

Подписано в печать 11.05.2023. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 5,87. Уч.-изд. л. 4,62. Тираж 50. Заказ 108.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.