

## Лекция 1. Стеклообразное состояние веществ и стекла

### 1.Процес перехода стекло-расплав.

Если вещества, которые находятся в расплавленном жидком состоянии охлаждать, то они затвердевают, и могут кристаллизоваться, или перейти в стеклообразное состояние, как показано диаграммой на Рис.1. По кривой графика 1 видно, что расплав переохлаждается, выделяется скрытая теплота кристаллизации и при температуре плавления  $T_{пл}$ , за некоторый промежуток времени вещество кристаллизуется, а затем охлаждается в твёрдом состоянии. Кривая графика 2 не имеет изломов, что свидетельствует о постоянном и плавном изменении свойств вещества при застывании в твёрдое стеклообразное состояние. При этом нет определённой температуры плавления жидкости. Процесс перехода стекло-расплав является обратимым, а частицы вещества не располагаются в определённую пространственную решётку. Стекловидное вещество становится твёрдым, аморфным и изотропным.

Температура  $T_f$  соответствует вязкости  $10^4$  Па·сек. В стекле начинают появляться пластические свойства, и оно может вытягиваться в тонкие нити.

Температура  $T_g$  соответствует вязкости  $10^{10}$  Па·сек. В стекле начинает появляться хрупкость.

Кривая выше  $T_f$  соответствует расплаву, а ниже температуры отжига  $T_g$  – соответствует твёрдому стеклообразному состоянию вещества.

Интервал  $T_g - T_f$  называют интервалом размягчения, в котором расплав постепенно и непрерывно получает свойства твёрдого стеклообразного вещества. Некоторые свойства стекла вне интервала изменятся по прямолинейному закону, а в интервале между  $T_g$  и  $T_f$  по криволинейному.

### 2.Стекловидные вещества

Большинство веществ, используемых в оптическом производстве, можно перевести из жидкого состояния в твёрдое и получить в стеклообразном состоянии. Например серу, селен, окислы  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , а также некоторые халькогениды. Вещества, находящиеся в стеклообразном состоянии широко распространены: смолы, глицерин, метилметакрилат, полиэтилен и т.д. Некоторые стекловидные вещества при комнатной температуре и атмосферном давлении могут находиться в твёрдом, жидком или пластическом состоянии, составляя группу оптических сред.

Оптические среды – это оптическое стекло, плёнки покрытий на оптических деталях, слои клеящего вещества.

### 3.Теория строения стекла

Известный русский учёный Менделеев обосновал представление о стекле как о сплаве окислов некоторых химических элементов. Он уподобил стекло переохлаждённой жидкости находящейся в твёрдом состоянии.

Позже в 1921 г. академик Лебедев, изучая изменение показателя преломления стекла в зависимости от температуры, показал, что до температур  $500^0 - 600^0 \text{C}$  этот процесс обратимый, после быстрого охлаждения стекла с более высоких температур значение показателя преломления резко изменяется, и процесс теряет обратимость – в стекле произошли структурные изменения. Создано представление о микрокристаллической природе стекла как о сцеплении чрезвычайно мелких деформированных кристаллов силикатов и кремнезёмов. Они объединены в структуру, в которой нет полного взаимного

проникновения разнородных молекул, а имеется преимущественное взаимодействие однородных молекул с образованием малых самостоятельных структурных микро групп. Такую структуру называют микрогетерогенной (неоднородной). Кристаллит представляет собой зародыш деформированного кристалла, центральная часть, которая имеет упорядоченное строение, а периферия является микро областью переходной к другому химическому составу. Между микро областями нет границ раздела, что было подтверждено экспериментами.

Позже академик Гребенщиков показал, что при обработке образца стекла уксусной, соляной и др. кислотами выщелачивается натриево- и калиевооборотная составляющая и остаётся 9-5 %-е кремнезёмное стекло. Размеры и формы образца не изменяются.

В начале 30-х г. Захариазин выдвинул теорию строения стекла получившую известность под названием теории непрерывной сетки. По этой теории координационные полиэдры окислов способны затвердеть в виде стекла и создавать прочную увязанную структурную сетку. В этой сетке центральный ион-атом стеклообразователя окружён ионами-атомами кислорода и другого двухвалентного элемента расположенными в общих вершинах тетраэдра. Некоторые ионы-атомы связаны только с двумя центральными атомами и не образуют связей с другими катионами. По этой теории окислы типов  $R_2O_3$ ,  $RO_2$  и  $R_2O_5$  дают стеклообразования, а окислы типов  $R_2O$  и  $RO$  не образуют стекла.

#### 4. О кристаллизации стекла

Чтобы избежать появления кристаллов в стекле нужно знать законы, управляющие числом новообразований и их линейным ростом. В жидком состоянии расплава молекулы совершают хаотическое тепловое движение и сталкиваются одна с другой, образуя метастабильные агрегаты, которые перегруппировываются и образуют центры кристаллизации. К этим центрам присоединяются новые частицы вещества и кристаллы растут. При дальнейшем понижении температуры скорость движения молекул уменьшается, но кристаллы ещё растут под влиянием увеличения коэффициента диффузии, который зависит от вязкости. При дальнейшем переохлаждении вязкость возрастает чрезвычайно быстро и рост кристаллов прекращается. Процесс кристаллизации можно представить в виде следующих графиков на Рис.2.

Способность расплава кристаллизоваться выясняется из взаимного расположения графиков ЧЦК и ЛРК. ЧЦК – это есть скорость образования некоторого числа центров кристаллизации, т.е.  $\frac{\Delta Z}{\Delta t}$ , где  $\Delta Z$  - приращение центров кристалла,  $\Delta t$  - приращение

температуры. ЛРК – скорость линейного роста кристаллов  $\frac{\Delta l}{\Delta t}$ , где  $\Delta l$  - приращение размеров кристаллов.

Если максимумы ЧЦК и ЛРК находятся при близких температурах, то кристаллизация наступает легко, а если они разнесены, то кристаллизация затруднена. Максимум ЛРК для всех расплавов лежит вблизи температуры плавления, благодаря этому большинство расплавов можно перевести в стеклообразное состояние. Если абсолютное значение максимума ЧЦК велико, то образуется большое число мелких кристаллов. Если же велик максимум ЛРК, то образуются кристаллы большого размера. Чёткое представление о кристаллизационной способности расплава стекломассы данного химического состава позволяет целенаправленно управлять режимом варки, выработкой и термической обработкой стекла добиваясь его получения без кристаллизации. Увеличение числа вязких компонентов состава, хороший провар и однородность шихты, снижают кристаллизационную способность стекломассы.

## 5. Стёкла оптические

Стёклами называют вещества находящиеся в стеклообразном состоянии, которому присущи следующие признаки:

- 1) твёрдость при обычной температуре;
- 1) прозрачность хотя бы для некоторой части спектра видимого излучения;
- 2) малая электро и теплопроводность;
- 3) стойкость к реагентам атмосферы и воды;
- 4) однородность по всему объёму.

Стекла, которые удовлетворяют этим признакам, называются промышленными, техническими или оптическими в зависимости от их назначения.

Стёкла состоят главным образом из окислов, которые делят на

- 1) кислотные:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и др.;
- 2) основные:  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{BaO}$ ;
- 3) двойственного действия:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Стёкла оптические определяют по 100%-й формуле химического состава. Например, 72% -  $\text{SiO}_2$ , 10% -  $\text{CaO}$ , 18% -  $\text{K}_2\text{O}$ . Для придания стёклам специальных свойств по твёрдости, цвету, радиационной устойчивости в них добавляют определённые химические элементы.

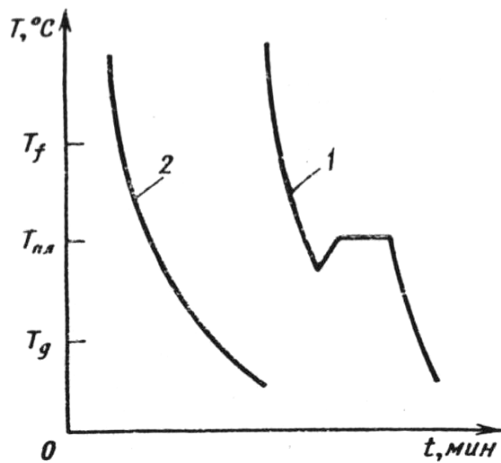


Рис. 1. Процессы застывания жидкостей в твердое вещество

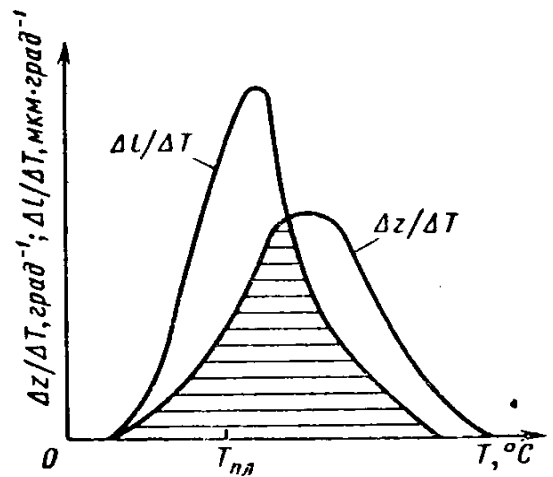


Рис. 2. Процессы кристаллизации в зависимости от температуры

## **Лекция 2. Оптическое безцветное неорганическое стекло**

### **1. Типы и марки оптических безцветных стекол**

Оптические стекла характеризуются показателем преломления, средней и частной дисперсией (относительные частные дисперсии и коэффициент дисперсии), которые определяют область применения оптических стекол в соответствующих приборах. В качестве номинального согласно ГОСТ 3514-76 установлен показатель преломления  $n_d$  для линии ртути, имеющей длину волны  $\lambda=546,7\text{nm}$ . Дисперсия определяется разностью показателей преломления для двух выбранных длин волн. Номинальной установлена средняя дисперсия  $n_F - n_C$  для линий кадмия имеющих соответственно длины волн 480nm и 643,8nm. Оптическое бесцветное неорганическое стекло в зависимости от расположения на диаграмме показатель “преломления – коэффициент дисперсии” подразделяют на следующие марки:

ЛК - легкий крон;  
ФК - фосфатный крон;  
ТФК - тяжелый фосфатный крон;  
К - крон;  
БК - баритовый крон;  
ТК - тяжелый крон;  
СТК - сверхтяжелый крон;  
ОК - особый крон;  
КФ - крон флинт;  
БФ - баритовый флинт;  
ТБФ - тяжелый баритовый флинт;  
ЛФ - легкий флинт;  
Ф - флинт;  
ТФ - тяжелый флинт;  
СТФ - сверхтяжелый флинт;  
ОФ - особый флинт.

Каждый тип стекол в зависимости от значений показателя преломления  $n_d$  и средней дисперсии  $n_F - n_C$ , определяемых химическим составом и режимами термической обработки стекла включает несколько марок обозначаемых соответствующими номерами. В общей сложности ГОСТ 3514-76 содержит 95 марок стекол, которые подразделяются на две серии. Обычные оптические стекла имеют нумерацию от 1 до 99. Стекла серии 100 и более это радиационно-устойчивые стекла, которые мало темнеют под воздействием излучения.

### **2. Показатели качества оптических безцветных стекол.**

Качество изображения, создаваемого оптическим прибором, находится в прямой зависимости от качества материала из которого изготовлены детали оптической системы. В соответствии с ГОСТ 3514-76 оптическое безцветное неорганическое стекло в заготовках нормируется по следующим параметрам:

- 1) показатель преломления  $n_e$ ;
- 2) средней дисперсии  $n_F - n_C$ ;
- 3) однородности партии заготовок по показателю преломления;
- 4) однородности партии заготовок по средней дисперсии;
- 5) оптической однородности;
- 6) двойному лучепреломлению;
- 7) радиационно-оптической устойчивости;
- 8) показателю преломления  $\epsilon_A$ ;
- 9) безсвильности;
- 10) пузырьности.

Все перечисленные требования могут быть сведены в две группы: основные, определяющие качество деталей, и дополнительные. Причем, в зависимости от служебного назначения детали эти требования можно группировать различными способами. Необоснованное снижение основных требований к материалу заготовки приводят к заметному ухудшению работы всего прибора в целом. Повышение требований к показателям, которые не являются определяющими, не обеспечивает заметного улучшения всего прибора в целом, повышает его стоимость.

Предельное отклонение показателя преломления  $n_e$  и средней дисперсии  $n_F - n_C$  от значений установленных для стекол всех марок нормируется пятью категориями:

1) числовые значения предельных отклонений для всех категорий находятся в пределах от  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-4}$  для  $n_e$  и от  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-5}$  для  $n_F - n_C$ ;

2) однородность партии заготовок стекла по показателю преломления  $n_e$  нормируется четырьмя классами. Числовые значения предельных отклонений  $n_e$  для всех классов лежат в пределах от  $\pm 0,2 \cdot 10^{-4}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-4}$ ;

3) однородность партии заготовок стекла по средней дисперсии нормируется двумя классами. Числовые значения предельных отклонений составляют от  $\pm 1 \cdot 10^{-5}$  до  $\pm 20 \cdot 10^{-5}$ ;

4) оптическая однородность показателя преломления во всем объеме заготовки в зависимости от ее размеров и условий работы деталей оценивается по ее разрешающей способности или по ее оптическому градиенту показателя преломления, характеризуемого волновыми аберрациями. Установлено пять категорий оптической однородности;

5) двойное лучепреломление является показателем качества отжига стекла, который характеризуется разностью хода (в миллиметрах на один сантиметр пути) двух лучей, на которые разделяется падающий луч под действием остаточных напряжений в толще стекла в направлении наибольшего размера.

Допускаемое двойное лучепреломление нормируется пятью категориями. Числовые значения для всех категорий находятся в пределах от 1,5 до 65 нм/см. У заготовок малого размера двойное лучепреломление не оказывает существенного влияния на качество изображения, а проявляется лишь для деталей, имеющих значительную толщину.

Показатель преломления  $\epsilon_A$  есть величина обратная расстоянию, на котором поток излучения от источника типа А ослабляется в результате поглощения и рассеяния в 10 раз.

Установлено 8 категорий, допускаемых значений показателя ослабления, который находится в пределах от  $2 \bullet 10^{-4}$  до  $130 \bullet 10^{-4}$ .

Свили являются резко выраженными локальными оптическими неоднородностями стекла. Они представляют собой прозрачные нитевидные или слоистые включения имеющие показатель преломления отличный от показателя преломления основной массы стекла. Наличие в стекле свилей резко снижает качество изображения, формируемого оптической системой. Класс безсвильности характеризуется отсутствием видимых включений при просмотре образца стекла в одном (А) или двух (Б) взаимно перпендикулярных направлениях. Установлено две категории безсвильности. Установлено, что если стекло безсвильно в двух взаимно перпендикулярных направлениях, то оно безсвильно и в любом другом направлении. Наличие в стекле слоистых свилевидных включений вызывает астигматизм в оптических деталях.

Пузыри нормируются из-за видимости их в поле зрения прибора, что приводит к появлению различных пятен в изображении и увеличение коэффициента диффузного рассеяния света, а как следствие снижение освещенности в плоскости изображений. Пузырность характеризуют диаметром наибольшего пузыря допускаемого в заготовке при ее просмотре. Установлено 11 категорий пузырности. Допустимые предельные отклонения диаметров пузырей для всех категорий находятся в пределах от 0,002 до 5 мм. Присутствие на поверхности вскрытых пузырей исключает возможность получения поверхностей высоких классов чистоты. Крупные пузыри вызывают появление вокруг них местных ям на поверхности. Они также затрудняют очистку поверхностей, нанесение на них покрытий высокого качества, соединение склеиванием или оптическим контактом. Вскрывшиеся пузыри являются также центром химического и биологического разрушения полированных поверхностей детали.

## Лекция 3 . Свойства оптических бесцветных стекол

### 1. Механические свойства стекла.

Механические свойства стекла оцениваются следующими показателями: прочность, твёрдость, хрупкость, упругость.

*Прочность* определяет предельное напряжение, вызывающее его разрушение. Специфической особенностью стекла является сравнительно высокая прочность при сжатии  $\sigma_c = (50 \div 80) \cdot 10^{-7}$  Па и низкая при растяжении  $\sigma_p = (8 \div 15) \cdot 10^{-7}$  Па. Главным фактором, снижающим прочность стекла является нарушенный слой, образующийся на поверхности заготовок в результате их механической обработки и взаимодействия с водой. Прочность стёкол можно повысить глубоким шлифованием и полированием, при котором удаляют поверхностный трещиноватый слой и сохраняют высокое качество поверхности. Удаление дефектного поверхностного слоя травлением повышает прочность стекла в 2-4 раза, но снижает качество поверхности.

*Твёрдость* – это способность его сопротивляться проникновению в него другого тела. Различают твёрдость:

- 1) Склерометрическая – определяется по царапанью;
- 2) Абразивную – по скорости сошлифовывания;
- 3) Микротвёрдость – по отпечатку вдавливаемого инденторатора в виде пирамиды.

В оптическом приборостроении пользуются относительной твёрдостью по сошлифовыванию – это соответствует отношению объёма сошлифованного стекла марки К8 к объёму сошлифованного стекла другой испытываемой марки в стандартных условиях обработки. Например, относительная твёрдость по сошлифовыванию ОФ5 составляет 0,3; для К8 – 1; для СТК12 – 3. Стёкла, имеющие твёрдость по сошлифовыванию больше 1 подвержены царапанью меньше, чем стёкла, имеющие твёрдость меньше 1.

*Хрупкость* стекла определяет его сопротивляемость динамическим нагрузкам, например, ударам.

*Упругость* стёкол обуславливает их способность восстанавливать свою первоначальную форму после снятия напряжения. Прочность контактного соединения стёкол обратнопропорциональна модулю их упругости. Так, например, модуль упругости Е стёкол ЛК6 -  $498 \cdot 10^8$  Па, для К8 -  $823 \cdot 10^8$  Па, для СТК9-1182  $\cdot 10^8$  Па.

### 2. Тепловые свойства стекла.

В оптическом производстве применяют технологические процессы, связанные с выделением или поглощением стекла стекломассой. Поэтому тепловые свойства имеют важные значения и должны учитываться при назначении режимов обработки стекла. Тепловые свойства стекла характеризуют: удельная теплоёмкость, теплопроводность, тепловое расширение, термостойкость, температура спекания  $T_{сп}$ .

*Удельная теплоёмкость* – это количество необходимое при данной температуре для нагревания единицы массы стекла на  $1^\circ\text{C}$ . Теплоёмкость оптических стёкол имеет следующее значение для некоторых марок стёкол: для ТФЗ –  $C=0,407$  КДж/ $^\circ\text{C}$ , К8 –  $C=0,739$  КДж/ $^\circ\text{C}$ , Кварц –  $C=0,8895$  КДж/ $^\circ\text{C}$ .

*Теплопроводность* стекла определяется его способностью передавать тепловую энергию в направлении более низких температур. С повышением температуры теплоёмкость стёкол повышается. Повышенную теплопроводность имеют стёкла с большим содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ba}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ . Предельным случаем является кварцевое стекло. Стёкла

содержащие много PbO и BaO имеют низкую теплопроводность. Теплопроводность стёкол характеризуется коэффициентами теплопроводности и температуропроводности.

*Тепловое расширение* стекла характеризуется коэффициентами линейного  $\alpha$  и объёмного  $\beta$  расширения. Коэффициент расширения стекла зависит в первую очередь от его химического состава. У оптических стёкол он изменяется в довольно широких пределах. Так, например, для кварцевого стекла это  $2 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , для ЛК5 –  $33 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , для ЛК1 –  $111 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

*Термостойкость* стёкол – это способность стёкол выдерживать без разрушения резкие перепады температуры. Мерой термостойкости является разность температур, которую выдерживает стекло без разрушения. В отличие от других тепловых свойств, термостойкость зависит не только от химических свойств стекломассы, но и от геометрии и размеров заготовки, интенсивности теплообмена.

*Температура спекания*  $T_{\text{сп}}$  – это температура, при которой начинается спекание у образцов стекла размером  $20 \times 20 \times 10$  мм положенных один на другой полированными сторонами и нагреваемых с постоянной скоростью  $2^{\circ}\text{C}$  в минуту, что приводит к вязкости стекла  $10^9 \text{ Па} \cdot \text{сек}$ . Так, например, для стёкол  $T_{\text{сп}}$  имеют следующие значения: ТФ7 –  $460^{\circ}\text{C}$ , К8 –  $620^{\circ}\text{C}$ , ТК14 –  $680^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Химические свойства стекла.

Химические свойства стекла характеризуются химической устойчивостью. Установлено два показателя химической устойчивости: химическая устойчивость к действию влажной атмосферы, устойчивость к действию пятнающих реагентов. По устойчивости к действию влажной атмосферы оптические стёкла делят на:

Для силикатных стёкол: А – неналётоопасные;  
Б – промежуточные;  
В – налётоопасные.

Для несиликатных стёкол: а – устойчивые,  
у – промежуточные;  
д – неустойчивые.

По устойчивости к действию пятнающих реагентов силикатные и несиликатные оптические стёкла делят на следующие группы:

I – не пятнающиеся;  
II – средней пятнаемости;  
III – пятнающиеся;  
IV – нестойкие стёкла, требующие применения защитных покрытий.

Наиболее устойчивыми (группа I) являются кроны, кронфлинты, баритовые флинты, флинты и лёгкие флинты. Пятнающимися и нестойкими (III и IV группы) являются тяжёлые и сверхтяжёлые кроны, тяжёлые баритовые флинты, тяжёлые и особые флинты. Учет химических свойств оптических стёкол необходим с одной стороны для предотвращения нежелательного воздействия жидкой фазы обрабатывающих суспензий и окружающей среды на полированные поверхности оптических деталей, заготовок на всех стадиях их обработки. С другой стороны, для целенаправленного изменения поверхности при направленном травлении штрихов, меток, цифр и т.д.; образованию просветляющих, защитных и прочих покрытий определённой толщины за счёт гидролиза поверхности; интенсификации процессов полирования путём введения в состав полирующих композиций водных растворов окислителей; изменение прочностных и др. свойств оптического контакта за счёт различной толщины гидролизных плёнок.



## Лекция 5. Органические стёкла и оптические клеи

### 1. Оптические полимеры.

Полимерами (органическими стёклами) называют химические соединения молекулы, которое состоят из большого числа атомных группировок соединённых химическими связями в длинные цепи. По строению они делятся на линейные и сетчатые. В оптическом производстве полимеры применяют для изготовления оптических деталей ответственного назначения, а также для изготовления оптических клеев.

Большинство полимеров используемых в оптическом приборостроении – это полиметилметакрилат, полистирол, поликарбонат, которые являются аморфными термопластами, находящимися при комнатной температуре в стеклообразном состоянии. При повышении температуры полимеры переходят из стеклообразного состояния в высокоэластичные, а затем в вязкотекучее. При понижении температуры проходят все три стадии в обратном направлении.

Термореактивные полимеры при повышении температуры полимеризуются и приобретают сетчатое строение. Процесс затвердения этих полимеров необратим, т.е. приняв при нагревании определённую форму, они в дальнейшем не изменяют своего состояния. К положительным характеристикам органических стёкол относят: низкую плотность, малую хрупкость и невысокую стоимость. Недостатки: невысокая оптическая однородность, низкая твёрдость и образивостойкость, малую теплостойкость, высокий коэффициент термического расширения (в 10 раз больше, чем у стекла), способность накапливать статическое электричество, естественное старение (желтение).

Показатель преломления  $n_e$  полимеров находится от 1,49 до 1,58, а коэффициент дисперсии  $\nu$  от 57,6 до 29,9. Исследования показали, что структура полимеров представляет собой сложные надмолекулярные образования в виде глобул, дондритов и доменов, являющиеся одной из причин оптической неоднородности. Другой причиной оптической неоднородности органического стекла считают эффект двойного лучепреломления, вызываемый ориентацией полимерных молекул и наличие остаточного полимера, имеющего показатель преломления значительно отличающийся от основной полимерной среды.

Полимеры прозрачны в видимой и ближней инфракрасной области спектра. В длинноволновой области они прозрачны только в узких участках спектра.

### 2. Оптические клеи.

Для склеивания оптических деталей между собой используют специальные оптические клеи, которые должны иметь следующие свойства:

- 1) Высокую степень прозрачности, чистоту, оптическую однородность;
- 2) Соответствие показателя преломления значению одной из соединяемых деталей;
- 3) Переход в твёрдое состояние без деформации деталей;
- 4) Высокую механическую стойкость, влаго-, термо-, морозостойкость соединения.

В зависимости от функционального назначения склеиваемого компонента и условий его работы, значимость условий различно. Численные значения параметров оптических клеев приведены ниже в таблице.

*Бальзам* — это клей получаемый путём переработки живицы, пихтовых деревьев, в состав которых входит скипидар, канифоль, летучие эфирные масла. Бальзам может быть двух видов: обычный и пластифицированный. Пластификатор вводят для повышения

пластичности клея и устойчивости склеиваемого соединения в условиях низких температур. Свойства бальзама характеризуют твёрдостью, количественно её оценивают числом пенетрации, выраженным в сотых долях миллиметра, глубиной погружения иглы пенетromетра в вещество в стандартных условиях испытаний. По твёрдости бальзам разделён на следующие группы:

ВТ – весьма твёрдый;

Т – твёрдый;

С – средний;

М – мягкий;

ВМ – весьма мягкий.

По этому же признаку бальзам разделён на марки. Основные недостатки клея:

1) Узкий температурный интервал, в котором могут работать детали;

2) Их деформация, возникающая при склеивании;

3) Нарушение центровки.

Положительные качества – это способность выдерживать большое число расплавлений без существенного изменения свойств, возможность уменьшения деформации склеенного компонента его отжигом (нагрев до  $+60^{\circ}\text{C}$ ) и последующим охлаждением со скоростью  $0,5^{\circ}\text{C}$  в час. Клей применяют для соединения линз малых размеров.

*Бальзамин* – это продукт частичной полимеризации карбинола. Может находиться в жидком, вязком и твёрдом состоянии. Жидкий бальзамин – это полуфабрикат вязкого, получают перегонкой карбинола в вакууме. Твёрдый бальзамин получают после склеивания деталей в ходе дальнейшей полимеризации. Свет и тепло ускоряют этот процесс. Бальзамин применяют для соединения деталей, которые устойчивы к деформации, возникающей при склеивании деталей, а также которые в соответствии с условиями эксплуатации должны выдерживать динамическую нагрузку, вибрацию, тепловой удар, низкие и высокие температуры. Соединяемые детали предварительного нагрева не требуют, но для ускорения процесса полимеризации клея компоненты нагревают при температуре  $60^{\circ} - 70^{\circ}\text{C}$ . Полная полимеризация происходит в течение суток при температуре  $25^{\circ} - 30^{\circ}\text{C}$ . Наибольшая прочность соединения имеет место при толщине слоя клея  $0,005 - 0,006$  мм. В твёрдом состоянии бальзамин не растворим в бензине, керосине, маслах. Неправильно склеенные детали можно разъединить ударом по шву соединения при пониженной температуре ( $-10 \div 20^{\circ}\text{C}$ ), охлаждением жидким воздухом или нагревом до  $200^{\circ}\text{C}$ . Основные отрицательные качества бальзамина – оптическая неоднородность, малая эластичность.

*Бальзамин-М* отличается от рассмотренного компонентами окислительно-восстановительной системы, которые играют роль инициатора и ускорителя полимеризации. Благодаря их высокой каталитической активности процесс полимеризации клея идёт при температуре  $18 - 26^{\circ}\text{C}$ . Он оптически однороден; применяют для соединения деталей любого размера и отношения толщины к диаметру, деталей со светоделительными покрытиями, светофильтров, поляризов. Склеиваемые детали не нагревают и после соединения термообработке не подвергают.

*Клей акриловый* – раствор низкомолекулярного сополимера метил-, и бутилметакрилата в ксилоле. Применяют для склеивания поляризов, деталей из силикатного стекла, кальцита, квасцов, светофильтров и клиньев с желатиновыми и поливиниловыми плёнками, а также для соединения деталей из стекла с металлами (кроме олова, хрома, инвара, кобальта). Склеиваемые детали не нагревают, поэтому их деформация при высыхании клея незначительна. Для повышения механической прочности соединения слой высушивают при  $50 - 90^{\circ}\text{C}$  до полного испарения растворителя. Расклеивание компонента осуществляют погружением в ацетон или ксилол, а также нагревом до  $120 - 150^{\circ}\text{C}$ .

*Клей УФ-235М* – раствор полимера моновинилацелата в циклогексанол. Используют для соединения деталей из материалов, прозрачных в УФ области спектра от 220 нм. Склеиваемые детали должны быть нагреты до  $60^{\circ}\text{C}$ , а клей до  $90^{\circ}\text{C}$  для удаления из него пузырьков воздуха. Компонент расклеивают погружением в этиловый спирт или нагревом до  $120^{\circ}\text{C}$ .

*Клей ОК-60* – раствор кремнийорганической смолы в тетрахлорэтаноле. Его применяют для склеивания деталей из кристаллов, прозрачных в видимой и ИК областях спектра (до 8 мкм). Компонент сушат при комнатной температуре в течение 24 ч, затем для удаления растворителя прогревают 2 ч при  $120^{\circ}\text{C}$ . Расклеивают соединение погружением в ацетон на 6 – 7 ч.

*Клей ОК-50* – раствор полиаминов, выполняющих роль отвердителя, в жидкой модификации диановой эпоксидной смолы. Его применяют для склеивания деталей, работающих во влажном тропическом климате, соприкасающихся с морской водой, для соединения стекла с металлом (кроме олова, хрома, инвара, кобальта). Хорошая адгезия клея к стеклу определяет высокую механическую прочность соединения. Малая эластичность ограничивает разность коэффициентов термического расширения соединяемых материалов. Твердеет клей при комнатной температуре и деформации деталей не вызывает. При достаточной жесткости их конструкции, или ненормируемой величине деформации, склеенный компонент для ускорения процесса полимеризации клея и приобретения им влаго-, водостойкости прогревают при  $60^{\circ}\text{C}$  в течение 3 – 5 ч.

*Клей ОК-72Ф* – раствор представляющий собой смесь двух компонентов: эпоксидной смолы ЭД-5, растворённой в фенилглицидном эфире и вератоне, и определённой фракции полиэтиленполиаминов, модифицированной фенилглицидным эфиром. Используют для склеивания деталей из кристаллов, из стекла с различными покрытиями, деталей, работающих в условиях влажного тропического климата, соединения стекла с металлом, для герметизации межфасочного пространства деталей, склеенных бальзаминол и бальзамом при последующей закатке компонента в оправы. Твердеет клей при комнатной температуре и деформации деталей не вызывает.

*Клей ММА* – смесь двух растворов эпоксидной смолы в перегнанном мономере метилметакрилата. Один из них содержит триаллилцианурат и диметилапилин, другой перекись бензола. Продолжительность рабочего состояния клея после смешивания компонентов – около 20 мин. Полимеризуется при комнатной температуре и деформации деталей не вызывает. Клей не токсичен. Используют его для соединения деталей из стекла диаметром до 900 мм, работающих в различных климатических условиях.

*Сплав ТКС-1* – термопластический клей, используемый для соединения деталей из материалов с коэффициентами преломления  $n_e > 2$  (арсенид и антимонид индия, германий, кремний, стекла ИКС-24, ИКС-26, ИКС-30 и др.), одинаковыми коэффициентами термического расширения и допускающими нагрев до  $170^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 5.1 Свойства оптических клеев

Параметр	Бальзамин	ОК-50П	ОК-72Ф	ОК-90 <sub>пл</sub>	ОК-60	Бальзамин-ж	Бальзам	Акриловый клей	УФ-235М
Внешний вид	Прозрачная жидкость слабо желтого цвета					Прозрачное бесцветное вещество			
Чистота	В 5 см <sup>3</sup> клея допускается не более 10 пылинок (ворсинок), видимых при 6* увеличении в сходящемся пучке на темном фоне					Жидкое	Твердое	Жидкое	Студенистое
Продолжительность рабочего состояния, ч	2-3 при 18-20°С	0,5	0,6-0,8	5 при 18-20°С	Нсогра- ниченное время	0,6 при 18-20°С	До 8 в расплаве	Нсогра- ничена при герметизации	Нсогра- ничена
Вязкость при 20°С, Па·с	0,2-0,5	0,2-0,5	0,35-0,5	0,2	0,2-0,26	0,2-0,5		0,2-0,5	Не регламентируется
Допустимое Δα склеиваемых стекол	До 30·10 <sup>-7</sup>	До 60·10 <sup>-7</sup>	Более 60·10 <sup>-7</sup>	До 60·10 <sup>-7</sup>	До 30·10 <sup>-7</sup>	До 60·10 <sup>-7</sup>	До 30·10 <sup>-7</sup>	До 60·10 <sup>-7</sup>	До 60·10 <sup>-7</sup>
n <sub>D</sub> 20°С	1,5191± ±0,002	1,5801± ±0,002	1,586± ±0,002	1,5411± ±0,001	1,5151± ±0,002	1,518± ±0,001	1,53±0,01	1,4861± ±0,001	1,462± ±0,002

Продолжение таблицы 5.1

Параметр	Бальзамин	ОК-50П	ОК-72Ф	ОК-90 <sub>пл</sub>	ОК-60	Бальзамин-Ж	Бальзам	Акриловый клей	УФ-235М
Прочность на разрыв, 10 <sup>-5</sup> Па	40—60	100	100—130	160	35	40—60	40—60	100	40—60
Теплостойкость, °С	+80	+130	+130	+200	+150	+120	+50	+80	+50
Морозостойкость, °С (не менее)	—60	—170	—120	—60	—90	—60	—60	—60	—60
Влагостойкость при 98% относительной влажности и температуре 30—40°С, сут.	8—10	7—10	70	20	Не стоек	6—8	5—7	Более 30	Более 30
Усадка, %	14,0	6,5—7	3,6	8,0	14,5	10,5	Не регламентирована	40—50	40—60
Термодур в интервале от +50 до —60°С, циклов (не менее)	5	30	45	5	5	10	—	—	—

## **Лекция 4. Стекла оптические с особыми свойствами**

### **1. Цветные оптические стекла**

Цветные оптические стекла применяют для изготовления светофильтров, ограничивающих или ослабляющих пропускание света, заданного спектрального состава. Основной характеристикой цветного оптического стекла является нормированная спектральная кривая зависимости светопропускания  $\tau_\lambda$  или оптической плотности  $D_\lambda$  от длины волны  $\lambda$ . Каталог цветного оптического стекла, выпускаемого промышленностью, содержит 117 марок разделенных по 15 типов в зависимости от цвета. В обозначении стекла используют 2-3 буквы а за ними цифры. Например: УФС-1 (ультрафиолетовое стекло), ЖЗС-5 (желто-зеленое стекло), СЗС-22 (сине-зеленое стекло), ЗС-11 (зеленое стекло). Окраска стекла обуславливается введением в его состав химических красящих веществ (красителей) которые могут находиться в стекле в молекулярном растворенном или калоидном состоянии. Молекулярные красители - окислы тяжелых металлов: кобальт, железо, никель и др., которые при варке стекла полностью растворяются в его основе. Характер спектральной кривой пропускания у стекол окрашенных молекулярными красителями при изменении концентрации красителей практически не изменяется, а изменяется лишь интегральный коэффициент светопропускания. Избирательное поглощение света в них обусловлено резонансными колебаниями электронов красителей. При вторичной термообработке окраска стекла не изменяется.

Окраска стекол калоидными красителями: золотом, серебром, сульфатами и селенидами кадмия основана на избирательном рассеивании света дисперсными частичками красителей. Стекла содержащие калоидные красители в атомарном состоянии бесцветны. Окраска появляется в результате роста мельчайших кристалликов металла ( $L=100$  нм) при вторичной наводке. Наибольшее распространение среди этих стекол получили селенокадмиевые стекла, имеющие желтую, красную и оранжевую окраски.

### **2. Стекла светорассеивающие**

Стекла светорассеивающие (молочные) применяют для изготовления деталей диффузионно рассеивающих проходящий или отраженный свет. Их обозначение МС. Они получили рассеивающие свойства благодаря введению в их состав соединений фтора или фтористого натрия, обеспечивающих "глушение" стекла.

### **3. Стекла фотохромные**

Стекла фотохромные обратимо изменяют свою прозрачность в видимой части спектра в зависимости от величины освещенности и длительности облучения. После прекращения облучения пропускание стекла восстанавливается. Их применяют для изготовления

светофильтров, светозащитных очков и экранов и обозначают ФХС. Основными характеристиками фотохромных стекол является: коэффициент фотохромности  $K_{\phi}$  - это величина характеризующая уменьшение оптической плотности за 30 секунд термического обесцвечивания; чувствительность  $S_{\phi}$  - величина обратная количеству освещенности для получения добавочной оптической плотности равной 0,2.

#### **4. Радиационно стойкие стекла**

Радиационно стойкие стекла - это стекла которые сохраняют свои свойства под воздействием ионизирующего излучения. Большинство обычных оптических стекол под действием радиации темнеют, уменьшается их светопропускание до значения зависящего от дозы радиации и состава стекла. Устойчивость стекла к воздействию ионизирующего излучения характеризуется приращением оптической плотности  $\Delta D_H$ . Повышение радиационной устойчивости стекол достигается введением в состав добавок, способных предотвращать образование центров окраски. Наибольший эффект достигается введением в качестве добавки окиси церия  $\text{CeO}_2$ . Стекла содержащие  $\text{CeO}_2$  сохраняют светопропускание при облучении дозами до  $10^{+5}$  рентгена и обозначают серии выше 100. По другим свойствам радиационно стойкие стекла серии 100 не отличаются от своих аналогов серии 0.

#### **5. Стекла оптические люминесцирующие**

Стекла оптические люминесцирующие активированные неодимом имеют узкие полосы люминесценции, причем на полосу 1060 нм приходится до 80% всей энергии люминесценции. Их используют для изготовления активных элементов в твердотельных ОКГ с длинами волн 900, 1060, 1300 нм. Спектр поглощения стекол имеет много полос в видимой и ближней инфракрасной области спектра. Стекла обозначают ГЛС (генерирующие люминесцирующие стекла), характеризуются показателем поглощения  $K_{\lambda}$  при длине волны  $\lambda=586$  нм. Значение  $K_{\lambda}$  находится в пределах 0,19-0,47.

#### **6. Инфракрасные безкислородные стекла**

Инфракрасные безкислородные стекла это стеклообразное вещество, отличающееся от обычных стекол тем что в их составе нет химических соединений содержащих кислород, а процесс стеклообразования происходит в бескислородной среде. Наиболее известны халькогенидные безкислородные стекла, основным компонентом которых является трех сернистый мышьяк, селен, германий, теллур. Халькогенидные стекла прозрачные в инфракрасной области спектра от 1-17 мкм. Имеют высокую химическую и термохимическую прочность, обозначают ИКС, различаются границами пропускания и показателем преломления. Безкислородные инфракрасные стекла используют для изготовления оптических деталей и волоконных элементов работающих в инфракрасном диапазоне.

## **7. Стекло оптическое кварцевое**

Стекло оптическое кварцевое это однокомпонентное силикатное стекло на основе кремнезема  $\text{SiO}_2$ . Оно обладает следующими физико-химическими свойствами:

- 1) Прозрачность в широком диапазоне волн и радиочастот.
- 2) Высокая термостойкость.
- 3) Химическая и радиационная устойчивость.
- 4) Малый коэффициент линейного рассеивания.

Оптические кварцевые стекла применяют для изготовления прозрачных люков летательных аппаратов, уголковых отражателей, активных элементов ОКГ, оболочек источников света и других оптических деталей подвергающихся резким температурным воздействиям. В зависимости от основной области спектрального пропускания выпускается оптическое кварцевое стекло следующих марок: КУ1, КУ2 - прозрачные в ультрафиолетовой области спектра, КВ, КВР - прозрачные в видимой области спектра, КИ - прозрачные в инфракрасной области спектра.

## **8. Оптические ситаллы**

Ситаллы - это особый класс стеклокерамических материалов, имеющих микрокристаллическую структуру с кристаллами размером не более 1-2 мкм, равномерно распределенных по всему объему стеклообразного вещества. Оптические ситаллы отличаются особо тонкой зернистой структурой, размеры кристаллов не превышают длины полуволны видимого участка спектра. Оптическая плотность кристаллов и стекловидной массы совпадают или близки между собой что исключает светорассеивание на границах раздела фаз "стекло - кристалл". Ситаллы имеют повышенную по сравнению со стеклом термостойкость, механическую прочность и твердость. Коэффициент линейного расширения некоторых марок приближенно равен нулю. В оптической промышленности применяются ситаллы: СО115М, СО156, СО21.

СО115М - термостойкий ситалл с малым близким коэффициентом линейного теплового расширения. Применяют для изготовления оптических деталей в которых не допускается изменение формы поверхности с изменением температуры: астрономических зеркал, оптических деталей гироскопов, подставок интерферометров.

СО156 - ситалл с малым коэффициентом линейного теплового расширения. Отличается повышенной прозрачностью в видимой области спектра и лучшей однородностью. Применяют для изготовления пробных стекол и деталей измерительной техники.

СО21 - ситалл с малым коэффициентом линейного теплового расширения в пределах 0-+350°C. Обладает максимальной термостойкостью (до +700°C) и максимальной относительной твердостью по сошлифовыванию. Применяют для изготовления деталей приборов лазерных гироскопов и приборов работающих в космосе.



## **Лекция 6. Методы стекловарения**

### **1. Технологичность составов стекла**

Состав оптического стекла назовем технологичным, если для его изготовления с заданными значениями оптических параметров можно применить проверенный экономично эффективный технологический прием с учетом всех особенностей производства. Основная задача при варке оптического стекла получить для данной марки значение показателя преломления и дисперсии заданные ГОСТом. Выполнение этой задачи приводит к многокомпонентному составу смеси и создает ряд трудностей в осуществлении процесса варки высококачественного стекла. Оптическое стекло многих марок нетехнологичны: пузырьны, тугоплавки, очень часто затруднена подготовка и очистка сырьевых материалов, изготовление сосудов для варки и мешалок, регулировка процесса варки. Другая важная задача получить высокую степень однородности оптического стекла любой марки. Решение этих задач определяет всю технологию производства оптического стекла. В состав некоторых особых стекол могут вообще не добавляться стеклообразующие окислы.

### **2. Сырьевые материалы**

Кислотные, щелочные и щелочноземельные окислы вводят в состав стекла в виде природных материалов, продуктов химической промышленности. Для получения широкой номенклатуры оптических стекол высокого качества и в частности стекол работающих в инфракрасной области излучения применяют стекломатериалы в виде химически чистых реактивов, а вместо кварцевого песка - жирный кварц. В таблице приведены главные химические компоненты, которые используются для получения стекла. Стеклomатериалы используют в виде зерен размером от 0,05-0,03 мм. Зерна большего размера, особенно тугоплавких компонентов, плохо провариваются и могут оставаться в стекле в виде камней. Зерна меньшего размера комкаются и тоже не провариваются. Материалы поглощающие влагу и  $\text{CO}_2$  из воздуха комкаются и комкают смесь, расплываются создавая неоднородность состава смеси по ее объему, что способствует появлению неоднородностей в стекле. Примеси в смеси повышают его светопоглощение, окрашивают стекло. Наиболее вредные: железо, хром, никель, медь. В материалах, используемых для варки оптического стекла, должно содержаться не более: железа -  $200 \cdot 10^{-5}\%$ , никеля -  $5 \cdot 10^{-5}\%$ , хрома -  $10 \cdot 10^{-5}\%$ , меди -  $20 \cdot 10^{-5}\%$ . Кроме основных (выше в таблице) компонентов в состав стекла в малых количествах вводят ускорители, осветлители, обесцвечиватели.

Ускорители уменьшают температуру варки стекла и способствуют осветлению стекла: соединения фтора,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , аммонийные соли.

Осветлители содействуют удалению пузырей из стекла в процессе варки. Это триокись мышьяка, сурьмы.

Обесцвечиватели способствуют получению стекла безцветных оттенков, нейтрализуют действие железа, переводя  $\text{FeO}$  в  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Это трехокиси мышьяка, сурьмы, селитра,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , фториды.

### 3. Подготовка стекломатериала

Полный цикл подготовки стекломатериалов состоит из технологических операций:

- 1) дробление;
- 2) помол;
- 3) обогащение;
- 4) сушка;
- 5) просев;
- 6) усреднение.

Стеклomатериалы проходят различные операции технологического цикла подготовки в зависимости от исходного состояния, в котором они находятся: кусковым, сыпучем, гигроскопичном. Стеклomатериалы хранят в специальных складах, каждый в отдельном отсеке, упакованный в мешки, бочки, банки, а ядовитые - в специальной вакуумной таре, в закрытом помещении. Подготовка кварцевой муки для стекловарения выполняют на специальной технологической линии (рис.6.1). Куски кварца из склада 1 подаются грейферным краном 2 в ячейки, которые имеют размер  $250 \times 250$  мм. Из бункера лотковым питателем 4 освобождают по дороге от земли и мелких примесей, кварц подается в щековую дробилку 5, из которой выходят куски размером около 50 мм. Они подаются ленточным конвейером 6 и ковшовым элеватором 7 для промывки в бункер 8 и барабан 9 который вращается с частотой 10 об/мин; диаметр барабана около 500 мм, длина 2000 мм, наклонен под углом в  $3^\circ$ . В барабан 9 вместе с кусками струей попадает вода из сопел 10. Кварц отмывается и сползает по лотку 11 в печь обжига 12. Печь внутри футерована огнеупорным материалом, непрерывно вращается со скоростью 2 об/мин, диаметр печи 800 мм, длина печи 4000 мм и наклонена под углом  $2^\circ$ . В печи создается пламя форсунками 13 при температуре  $900^\circ\text{C}$ , время прохождения кусков 10-15 мин. Из печи 12 кварц периодически подается на роторный подъемник 14 ковши которого в нижнем положении проходят через бак 15 с холодной водой. Далее кварц поднимается в бункер, вода сливается, а кварц подсушивается внутренним теплом. После резкого охлаждения он теряет прочность и в трубчатой шаровой мельнице 20 легко размалывается. На ленте транспортера 16 кварц обдувается из сопла 17 сжатым воздухом для очистки от мелких частиц, слюды и пыли. Помол обожженного кварца - в шаровой мельнице 20, барабан которой вращается со скоростью 28 об/мин, длина барабана 6000 мм а диаметр - 1800 мм. На входном конце мельницы находится приемное сито 21, на выходном - контрольное сито 22. Отсевы подаются по трубам 23 для повторного помола, мука в бункер запаса 25. Сортировка обожженного кварца производится вручную на ленточном конвейере 24. Куски черные, желтые с прожилками полевого шпата отбрасываются. Особо чистые куски отбираются для варки особо прозрачных стекол, а затем

подготавливают отдельными порциями. Кварцевую муку контролируют на зернистость и на содержание примесей железа для установления сортности. Применяют еще и электрогидравлические дробилки, в которых кварц разрушается мощными гидравлическими ударами. Обогащение кварцевой муки, удаляющей примеси железа до  $3 \cdot 10^{-4}\%$  для производства особо прозрачных стекол. Выполняют в кипящей HCl растворяющей железо в течении 12 часов в фарфоровых котлах. Слив раствор кислоты муку промывают дистиллированной водой, бурлящей под действием подачи снизу воздуха. После обогащения кварцевую муку сушат в кварцевых сушилках. Только столь тщательное приготовление и обогащение кварца позволяет варить сверхпрозрачные стекла с поглощением 0,1-0,2%

#### **4. Расчет и приготовление шихты**

Шихта - смесь предварительно подготовленных, отвешенных при определенном соотношении и перемешаны до полной однородности стекломатериала. Часть компонентов шихты при нагреве улетучивается, иногда полностью. Некоторые прибавляются из-за частичного растворения стенок сосуда (горшка) в котором варят стекло. Набор материалов выбирают оценивая их технологичность, чистоту и цену. Технологичность определяют малой гигроскопичностью, зернистостью и сыпучестью. Степень чистоты стекломатериалов для стекловаренных заводов определяется возможностью получения природных материалов, препаратов химических производств, требующей кондиции и их экономически выгодной ценой. Смесь стекломатериала до засыпки должна быть сыпучей и не цементироваться. Проваривание составляющих шихты должен наступать одновременно при близких значениях температур, чтобы легко образовывались нужные химические соединения. Содержание и состав газовых сред должен способствовать осветлению стекла. Окислам в смеси отдается предпочтение, но они имеют высокую температуру варки и затрудняют осветление - в шихту добавляют соли. Расчетom устанавливают стекломатериалы, которые необходимо ввести в состав смеси, приготавливаемой для варки. Переход от окисла в синтетическом составе стекла к химическим соединениям которым он вводится через так называемые шихтные множители сведенные в справочные таблицы. Этот расчет учитывает как улетучивание так и прибавление некоторых соединений в процессе варки стекла. Расчет шихты служит основой для получения заданных значений оптических постоянных и допустимых значений светопоглощения и цветовой окрашенности стекла. Взвешивание в количествах установленных расчетом шихты с точностью до 0,1%. Взвешивание и смешивание в определенном порядке в зависимости от сыпучести и комкования материалов. Смешивание происходит в барабанах, вращающихся с частотой 20-40 об/мин. Контроль качества перемешивания определяется пробами, которые берут из смеси в различных участках ее объема, допустимое отклонение от среднего состава не должно превышать 3%.

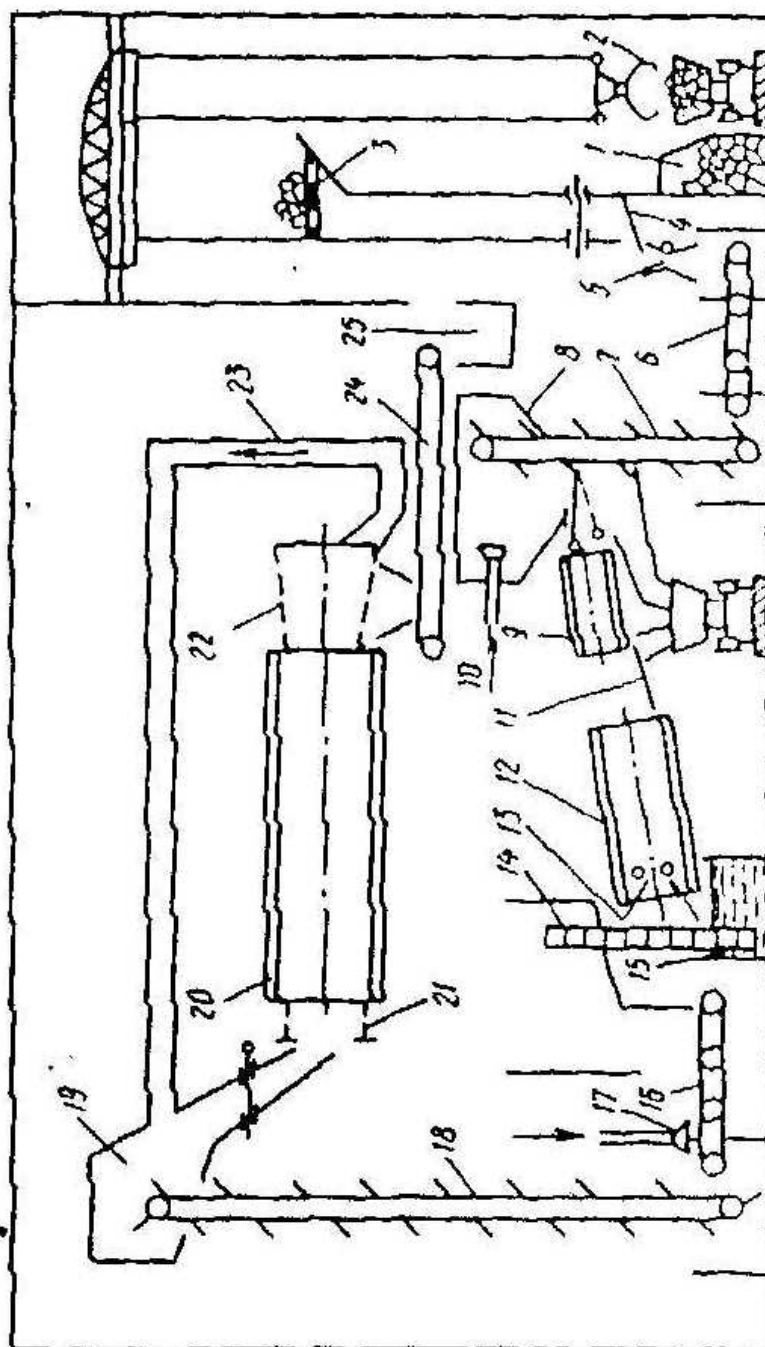


Рис.6.1 Технологическая линия подготовки кварцевой муки



Компоненты стекла	Оксиды	Гидроксиды	Соли				
			Нитраты	Карбонаты	Фториды	Фосфаты	Бораты
$Al_2O_3$	$Al_2O_3$	$Al(OH)_3$	—	—	$AlF_3$	$Al(PO_3)_3$	—
$Sb_2O_3$	$Sb_2O_3$	—	—	—	—	—	—
$MgO$	$MgO$	—	—	$MgCO_3$	$MgF_2$	$Mg(PO_3)_2$	—
$ZnO$	$ZnO$	—	—	—	$ZnF_2$	$Zn(PO_3)_2$	—
$La_2O_3$	$La_2O_3$	—	—	—	—	$La(PO_3)_3$	—
$Li_2O$	—	—	—	$Li_2CO_3$	$LiF$	$LiPO_3$	—
$BeO$	$BeO$	—	—	—	$BeF_2$	—	—
$Ti_2O$	—	—	$TiNO_3$	$TiCO_3$	—	—	—
$GeO_2$	$GeO_2$	—	—	—	—	—	—
$TeO_2$	$TeO_2$	$H_2TeO_4$	—	—	—	—	—

Примечание. R<sup>IV</sup> — некий элемент с валентностью IV.

## **Лекция 7. Способы и оборудование для варки оптического стекла**

### **1. Горшковые печи.**

Горшковые печи для варки оптических стёкол должны выдерживать длительный срок нагрева до  $1000^{\circ}\text{C}$ , обеспечивать возможность оперативного регулирования температуры в печи с точностью  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ , иметь окислительный или восстановительный характер атмосферы в печи. Для реализации технологического процесса варки оптических стёкол высокого качества и широкой номенклатуры марок требуются печи с манёвренным тепловым режимом в пределах температур  $700 - 900^{\circ}\text{C}$  и  $1500 - 1600^{\circ}\text{C}$ . В одной печи нельзя варить одновременно стёкла двух марок, т. к. они имеют различные тепловые режимы варки. Тепловая горшковая стекловарная печь показана на Рис. 7.1 состоит из верхней рабочей части размерами  $3500 \times 3000 \times 3000$  мм, находящейся над уровнем цеха, и нижней, размерами  $7000 \times 3000 \times 3000$  мм, состоящей из регенераторов, расположенных над полом цеха.

Печь имеет четыре симметрично расположенных шахты **2** и **3** регенератора, заполненные кирпичной кладкой и периодически переключающиеся две шахты **2** работают для подогрева воздуха и две шахты **3** – для подогрева горючего газа горячими газами из отходящей камеры печи. Шахты регенератора через насадные шахты **1** связаны с дымоходом **10**. Карманы **4** служат для очистки печи от расплавленной шихты, не попавшей в горшок, или выплеснувшейся из него при спенивании, и снятия пенки.

Смесь воздуха и газа образуется угарелок. Далее пламя попадает в рабочую камеру **6**, в которой установлен стекловаренный горшок. В передней стенке печи имеется проем, через который вставляется и вынимается горшок, закрываемая заслонкой **9**. В задней стенке печи есть окно **7** для засыпки шихты, через которое также ведут наблюдение за варкой и освещением при перемешивании стекломассы. В центре свода по оси печи расположено отверстие для ввода и вывода пропеллерной мешалки. Через это отверстие по трубам **8** подают и отводят воду для охлаждения мешалки. Вся внутренняя поверхность рабочей камеры футеруется огнеупорной керамической массой выдерживающей длительное время при  $1600 \div 1700^{\circ}\text{C}$ .

### **2. Ванные печи.**

Ванные печи применяют для варки стёкол одной марки в больших количествах. В ванных печах всегда есть два бассейна: варочный и выработочный, которые разделены брусом и протоком под ним. Схема типовой ванной печи показана ниже на рисунке 7.2.

Стекломасса перемещается вдоль печи под действием веса загружаемой шихты и понижения уровня расплава из-за выработки стекломассы с противоположной стороны. Ванные печи действуют непрерывно. Стекломасса перемешивается в них только за счёт конвекционных потоков. Для варки небольших порций стекла применяют малые ванные печи, которые действуют периодически, и стекломасса перемешивается в них принудительно. Верхняя часть печи находится над полом **10** стекловаренного цеха. Шихта поднимается через загрузочный карман **1** в варочный бассейн, в котором температура примерно  $1450^{\circ}\text{C}$  поддерживается из регенератора подогретого воздуха.

Температура регулируется термопарами **3**. Брусья **5** служат для направления конвекционных потоков стекломассы. Через трубы **15** при необходимости бурлят стекломассу. Через проток **14** стекломасса попадает в выработочный бассейн, находясь на общем уровне **12**. Стекломассу перемешивают с частотой 40 об/мин двумя мешалками **6**, которые можно переставлять по высоте. Наблюдение за работой печи и состоянием

стекломассы ведут через люк 7. Вдоль направления движения стекломассы можно условно выделить следующие участки:

- А – засыпка;
- Б – варка;
- В – осветление;
- Г – проток;
- Д – перемешивание и гомогенизация;
- Е – выработка.

### **3. Стекловаренные сосуды.**

Сосуды (горшки) для варки оптических стёкол большинства марок делают из высокоогнеупорных материалов. К стекловаренным горшкам предъявляются следующие требования:

- 1) Огнеупорность до 1700°C на протяжении нескольких сотен часов;
- 2) Механическая прочность в холодном и горячем состоянии;
- 3) Устойчивость против разъедания стенок горячей стекломассой.

Горшки керамические для варки оптического стекла имеют ёмкость от 0,3 – 0,9 м<sup>3</sup> и конструкцию, показанную ниже на рисунке 7.3. Диаметр горшка 900 – 1500 мм, толщина кромки 100 – 200 мм, а толщина дна и стенок внизу в полтора раза больше. Сырьевым материалом для изготовления горшков служат огнеупорные глины и каолин. Глины огнеупорные с температурой плавления 1750°C состоят из полиминеральных смесей гидросиликатов. Такие глины измельчают до частиц 0,001 мм.

Каолин (белая глина) с температурой плавления 1800°C отличается меньшей загрязнённостью и большей дисперсностью. Смесь глины и каолина в соотношении 1:1 называют шамотом, который обжигают до полной усадки для изготовления горшков.

### **4. Стекловаренные мешалки.**

Стекловаренные мешалки делают пропеллерные или стержневые шпинерным литьём или металлическим трамбованием. Высота мешалки на 50 – 60 мм меньше высоты горшка.

Формообразования мешают литьём шпинера в гипсовые формы позволяет организовать поточную механизированную линию большого числа мешалок в крупносерийном производстве.

Шликер – это колоиднодисперсная смесь твёрдых частиц и электролита, которую при влажности 20 % заливают в гипсовые формы. Электролит – это 5%-й раствор жидкого стекла или карбоната натрия, который разжижает смесь и увеличивает текучесть массы. Процесс застывания шпинера длится четверо суток, затем мешалки обжигают и хранят в муфельных печах при температуре 900 - 1200°C.

### **5. Вспомогательное оборудование.**

Вспомогательным оборудованием служит грузовой кран грузоподъёмностью 5 тонн, обслуживающий печи варки и обжига стекла.

Используют также стол для проката стекла в лист. Размер стола 1000×5000 мм. Стол перемещается по рельсам от печи к печи. Массивная чугунная плита стола тщательно обработана на плоскость и выровнена по горизонтальности.

Вентиляция цеха построена как вытяжная. Большой объем тепла, выделяемого печами, распределяется по всему пространству цеха, высота которого 12 – 15 м, и удаляется через отверстие в крыше, что обеспечивает тепловое равновесие в зимнее и летние врем.



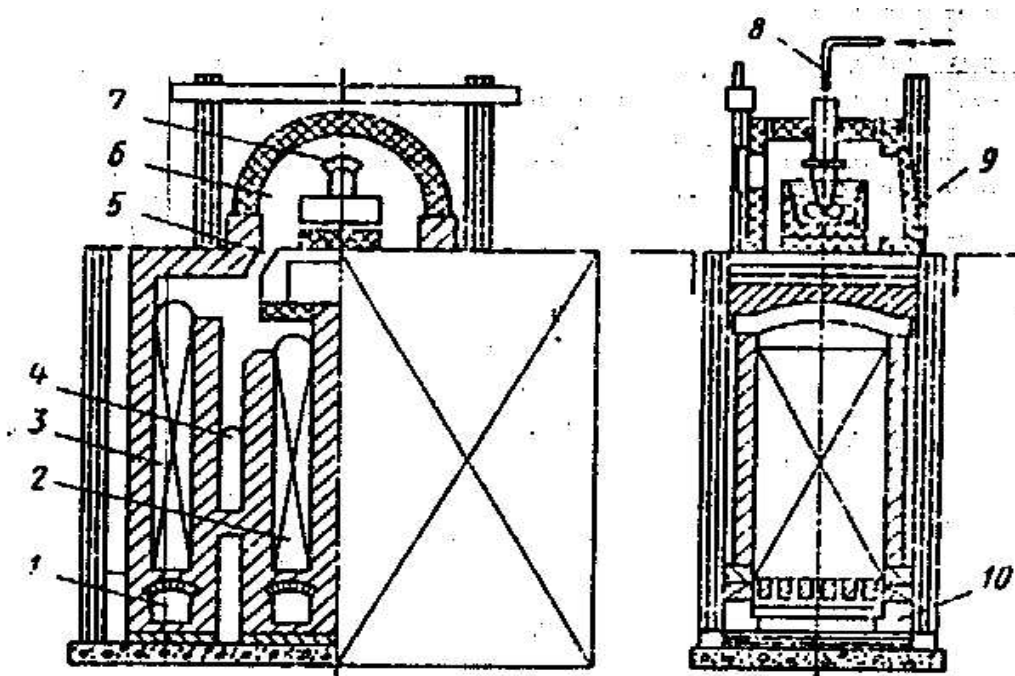


Рис.7.1 Типовая горшковая стекловаренная печь

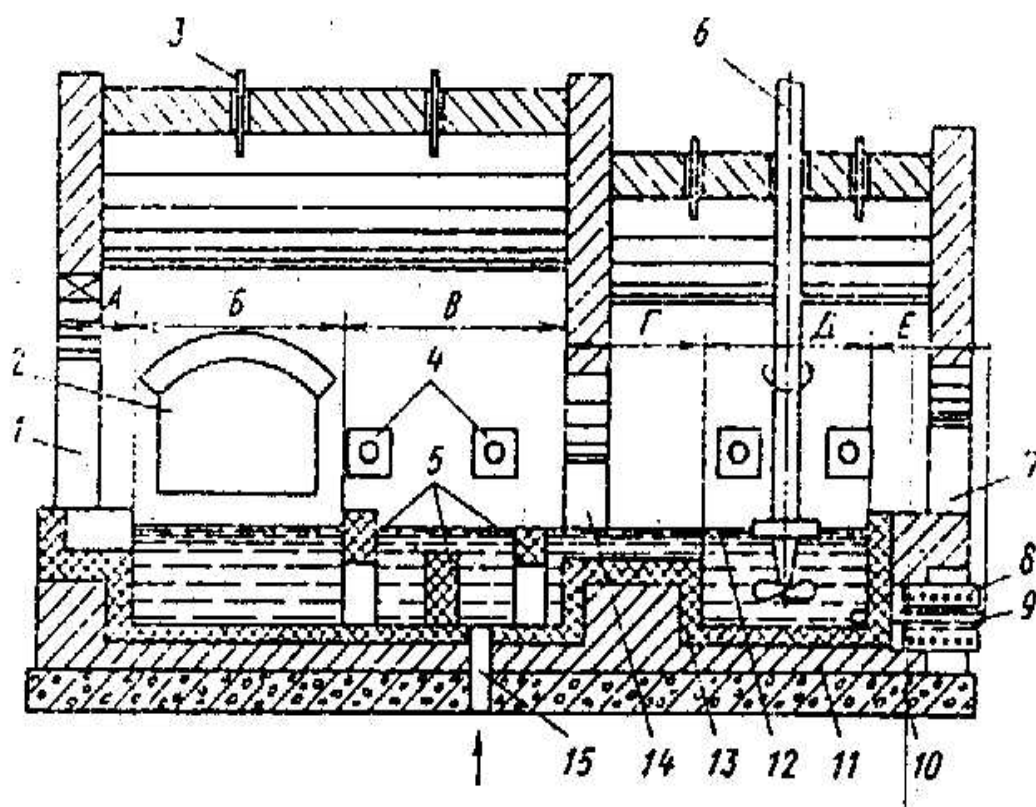


Рис.7.2 Ванная печь для варки оптического стекла

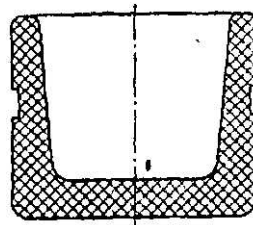


Рис.7.3 Стекловаренный керамический горшок

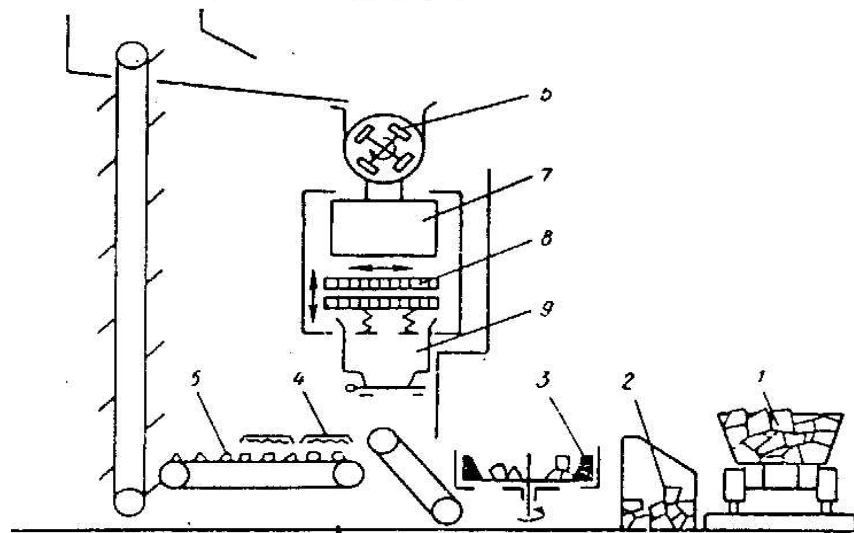


Рис.7.4 Технологическая линия подготовки глины

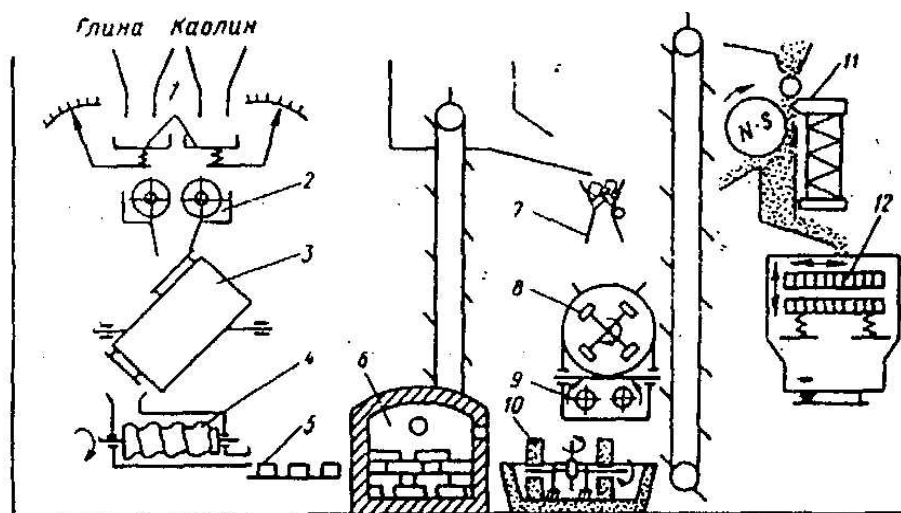


Рис.7.5 Технологическая линия приготовления шамота

## **Лекция 8. Процесс варки оптического стекла**

### **1. Стадии процесса варки оптического стекла**

***Варка – сложный тепловой процесс в течении которого компоненты смеси стекломатериала претерпевают ряд физических и химических изменений. Процесс варки можно условно разделить на стадии:***

**1) Силикатообразование;**

**2) Стеклообразование;**

**3) Осветление;**

**4) Гомогенизация;**

5) Охлаждение.

Стеклообразование, осветление и гомогенизация начинаются одновременно. После окончания стеклообразования последние стадии проходят совместно до завершения процесса варки. В результате протекания каждой стадии изменяется состояние стекла в физическом и химическом отношении по признакам которых удобно разделить процесс варки.

Силикатообразование начинает происходить уже при температуре 400°C когда заканчиваются основные химические реакции в твердых частицах и улетучиваются газообразные составы, испаряется вода, а не прореагировавшие компоненты спекаются. С дальнейшим повышением температуры плавятся эвтектические соединения и некоторые соли, твердые вещества растворяются в расплавах и реакции ускоряются. Большинство реакций эндотермические и для ускорения провара нужна интенсификация подачи стекла.

Стеклообразование начинается когда стекло представляет собой еще пенистый расплав, который насыщен частицами шихты, кварца и пузырьками газов. Кварцевый песок растворяется в расплаве силикатов, а силикаты провариваются, стекло становится прозрачным, число пузырей и пена уменьшается. Стеклообразование продолжительно во времени особенно для вязких составов стекла. Для низкотемпературных стеклообразующих необходимо интенсивно увеличивать температуру, перемешивать стекломешалкой, бурным выделением газов.

Осветление заключается в освобождении стекла от газовых пузырьков, т.е. выравнивание ее в физическом отношении. Шихта содержит до 18% песка связных газов, которые в

большинстве испаряется в печи но часть их остается в виде пузырьков, растворенных в стекле. Газы выделяются из расплава стекла благодаря причинам: изменению химического состава, неравномерному состоянию химически связанных компонентов, контакту с парами, кристаллами огнеупора горшка. Из газов образуются пузыри, содержащие  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , пары воды. Большое количество пузырей делает стекло не пригодным для изготовления оптических деталей. Чтобы легче удалить пузыри нужно сделать стекло менее вязким и создать в нем восходящий поток. Для этого повышают температуру на  $100^\circ\text{C}$  выше температуры провара шихты, и интенсивным механическим перемешиванием стекла, добавкой в состав стекла осветителей, которые интенсивно выделяют легкие пузырьки  $\text{O}_2$ , способствующие перемешиванию стекла и удалению тяжелых пузырей из  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ .

Гомогенизация – процесс приведения стекла к состоянию химической однородности. В следствии разнородности исходных гранулометрического и химического состава компонентов шихты жидкое стекло состоит из частиц малых объемов различных сплавов между которыми есть границы раздела. Тепловое и механическое движение частиц возникающее при проваре и осветлении в стекле, растягивает частицы имеющие разный химический состав и показатели преломления, в потоки, одиночные волокна – свили. Выравнивание составов потоков происходит путем диффузии. Гомогенизация ускоряется движением пузырей, конвекционных потоков и мешалки, растягивающих потоки грубых свилей в тонкие волокна, которые исчезают в результате диффузии.

Охлаждение необходимо для получения стекла вязкостью обеспечивающей ее отлив из стекло варенного сосуда. При охлаждении в стекле продолжают процессы осветления и гомогенизации. Режим охлаждения должен выдерживаться строго по графику – чтобы избежать появления кристаллизации. Нарушение теплового и концентрационного равновесия, самопроизвольного выделения по всему объему газов в виде мельчайших пузырей.

## **2. Технологические операции варки оптического стекла**

Построение технологического процесса варки оптического стекла различных марок в общем одинаковы. Различие заключается в графике температурных режимов, и во времени затрачиваемом на различные операции. Регулировка процесса варки преследует цель получения стекла наивысшего качества с минимальными пороками и дефектами. Технологический процесс варки оптического стекла делят на последовательно выполняемые во времени операции:

- 1) выводка горшка;
- 2) засыпка и провар шихты;

- 3) осветление расплава;
- 4) охлаждение стекла.

Выводка горшка заключается в том, что стекловаренный горшок перемещают из печи обжига (температура 900-1000°C) в стекловарную печь (температура 850-900°C). Горшок центрируют относительно оси вращения мешалки для обеспечения равномерности перемешивания. Потом для повышения сопротивления стенок горшка горячего стекла его нагревают до температуры 1450-1500°C и выдерживают 2-4 часа. Потом охлаждают в печи до уровня необходимого для засыпки шихты. Полное время вывода горшка – 10-15 часов.

Засыпка и провар шихты – на дно горшка засыпают возвратный бой из предыдущего стекла чтобы создать на дне слой стекла толщиной в несколько сантиметров защищающего дно горшка от разъедания расплавляющейся смеси стекла. После бурления разваренного боя засыпку смеси стекломатериала производят так, чтобы вершина образовавшегося конуса была на уровне среза горшка. Сверху этот конус покрывают слоем боя для ускорения образования расплава и уменьшения улетучивания компонентов шихты. Шихту засыпают в 3-5 приемов, последовательно перемешивая шихта и возвратный бой.

Осветление расплава начинается с повышения температуры в печи на 100°C и бурления стекла – берут мокрую осиновую чурку, набивают на конец стержня из жаропрочной стали не образующей оксиды и водят чурку в круговую не касаясь стенок горшка при этом вода из чурки испаряется и образует много крупных пузырей которые вызывают бурление стекла. Потом вводят в стекло разогретую предварительно мешалку, начинают перемешивание при малой частоте вращения, т.к. расплав еще вязок, особенно в нижних, более холодных слоях. В начальный период перемешивания способствуют температуре стекла по вертикали и проваривают шихта. Потом постепенно увеличивают скорость вращения до затвердевания провара шихты, т.е. когда начинается интенсивное удаление пузырей. Продолжительность осветления расплава – 4-5 часов.

Охлаждение стекла начинается после того когда количество пузырей уменьшается до допустимого предела. Сначала охлаждение ведут понижением температуры на 50-60°C/ч, и не уменьшают частоты вращения мешалки т.к. осветление расплава еще продолжается. При достижении расплавом вязкости 10 Па·с с поверхности стекла снимают слой стекла с пеной на глубину до 50 см. Потом скорость мешалки увеличивают, чтобы избавить стекло от оставшихся химических неоднородностей – гомогенизировать. С понижением температуры вязкость стекла повышается, и скорость мешалки уменьшается. При вязкости 500-1000 Па·с мешалку извлекают, открывают печь и вывозят стекловаренный горшок, потом начинается этап разделки стекла. Охлаждение стекла длится до 35-40 часов.

### 3. Пороки и дефекты стекла

Пороки оптического стекла – инородные включения: пузыри, свили, кристаллы и камни, которые образуются в процессе варки стекла в стекловаренных сосудах из-за разъедания и откалывания их стенок

. Дефекты оптического стекла – отклонение фактических значений показателя преломления, дисперсии и светопоглощения от номинальных значений, установленных для данной марки стекла соответствующими нормативными документами и техническими условиями на его изготовление

. Пузыри всегда есть в стекле – имеют размер 0,01-5 мм, крупные пузыри легче выходят из стекла в процессе его варки, а мелкие остаются в стекломассе. Наименее пузырьные – кроны, легкие флинт и флинты, наиболее пузырьны – тяжелый крон и тяжелый флинт. Главный способ удаления пузырей и уменьшения пузырьности стекла, соответственно – повышение температуры варки и интенсивное перемешивание стекломассы в стекловаренных сосудах.

Свили обнаруживают в стекле как разделения объемов стекла отличающихся один от другого показателями преломления и химическим составом. Бывают грубые слоистые и тонкие одиночные нитевидные свили. Разность показателей преломления в свильных объемах оптического стекла колеблется от  $10^{-6}$  до  $0,1 \cdot 10^{-6}$ . Свили образуются также в результате растворения материала стенок горшка и корпуса мешалки в стекломассе, которые приводят к изменению химического состава сваренного стекла. Чтобы избавиться от них необходимо проводить интенсивное перемешивание и постепенное медленное охлаждение стекла.

Кристаллы выделяются из самой стекломассы, или привносятся в нее огнеупором. Согласно ГОСТ 3514-76 размеры кристаллов приравниваются к пузырям. При нарушении режимов варки может начаться недопустимая кристаллизация стекла. Чтобы ее избежать необходимо как можно быстрее проходить температурную область кристаллизации стекломассы.

Камни привносятся в стекло извне, достаточно редкий порок стекла, может возникать еще из-за разъедания стекломассой дна горшка. Кусок керамики от горшка попадает в стекло, под ее воздействием округляется, уменьшается в размерах и превращается в тонкую свиль.

Отклонение показателя преломления  $n_e$  и дисперсии  $n_F - n_C$  – происходят из-за привнесения в стекло компонентов разъедания стенок горшка и неравномерности улетучивания компонентов смеси сырьевых материалов в процессе варки. Эти два процесса затрудняют получение хорошей повторяемости состава стекла от одной варки к другой в промышленных условиях.

Светопоглощение в оптических стеклах достигает 0,4-1,5 % на 1 см длины хода луча света в стекломассе, а в сверхпрозрачных стеклах 0,1-0,15 % на 1 см хода луча света, соответственно. Основная причина повышения светопоглощения – это наличие

дополнительных примесей в стекломатериале, возвратном бое, керамике горшков и мешалок. Наиболее вредные примеси – окислы железа, хрома, никеля, кобальта, которые повышают светопоглощение в стекле. Понижение светопоглощения достигается путем использования химически чистых и тщательно обогащенных стекломатериалов стекловарения, применением технологической оснастки дополнительно защищенной от соприкосновения сырьевой шихты с железными корпусами используемого технологического оборудования.

## Лекция 9. Производство стёкол с особыми свойствами и выращивание кристаллов

### 1. Цветные оптические стёкла

Варят из шихты основного Ca-Na, Ca-K-Na стекол, в состав которых дополнительно вводят красители в количестве 0,2 – 10% по массе. В качестве основных молекулярных красителей используют соединения:

- 1) Co (CoO) – окрашивают в синий цвет;
- 2) Cu и Fe (CuO и FeO) – окрашивают в красный цвет;
- 3) Ni (NiO) – окрашивают в фиолетовый цвет;
- 4) Cr (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CrO<sub>3</sub>) – окрашивают стёкла в зелёный, жёлтый и оранжевый цвета;
- 5) Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - поглощают инфракрасные излучения – теплофильтры.

Кроме концентрации красителей на окраску стёкол влияют температурные условия, продолжительность варки, окислительно-восстановительные свойства печи, соотношение в составе основного стекла кислотных и основных окислов. Это связано с тем, что такие красители как Cu, Cr и Fe имеют переменную валентность в соединениях с O<sub>2</sub> и образуют при определённых условиях соли с различной окраской.

### 2. Оптические ситаллы

Оптические ситаллы имеют основу из стекла Li<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub>. Кристаллизация в стекле вызывается введением в его состав катализатора TiO<sub>2</sub> и последующей обработкой в твёрдой фазе. Термообработка происходит в электропечах по режиму, предусматривающему 2 степени выдержки (рис 9.1).

- 1-я выдержка при температуре T<sub>1</sub>=1800°C обеспечивает условие для равномерного образования множественных центров кристаллизации по всему объёму.
- 2-я выдержка при температуре T<sub>2</sub>=880°C – интенсивный рост кристаллов до заданных размеров.

Оптические ситаллы выпускают в заготовках, имеющих форму дисков или листов с наибольшим размером до полутора метров.

### 3. Оптическое кварцевое стекло.

Оптическое кварцевое стекло варят из природного горного кварца, предварительно подвергающегося тщательной сортировке, комплексному обогащению и помолу на крупу размером зёрен до 0,1 мм. Допустимое содержание посторонних примесей не должно превышать  $3 \cdot 10^{-4} \%$ . Одним из основных методов варки кварцевого стекла является вакуум – компрессионный. Для этого кварцевую трубку загружают в тигель вакуумно-компрессионной печи и нагревают под вакуумом до расплавления при температуре T=1800÷1850°C. после этого в печь под давлением подаётся газ: азот, аргон или углекислота. Вакуумные межкусковые пустоты стекла под давлением газа распрессовывают и стекло после охлаждения получается безпузырным. Особо чистое оптическое кварцевое стекло получают в пламени водорода и кислорода с помощью установки, показанной на рис. 9.2.

В процессе варки шихту подают через электрический муфель 4 в камеру 3, где частички шихты подхватываются пламенем горелки 5 и, расплавляясь на лету, попадают на разогретую подложку 1, которая, медленно вращаясь, отводится по мере наплавки муфеля 2.



#### 4. Бескислородные стёкла

Бескислородные стёкла варят из материалов, не имеющих в своём составе кислорода. Основным компонентом является аурипигмент – природный минерал, содержащий до 50% мышьяка. Бескислородные стёкла варят в запаянных кварцевых ампулах, из которых предварительно откачивают воздух до давления 0,1 Па. Ампулы помещают в электрические печи и нагревают до 600°C. В процессе варки для размешивания стекломассы печи с ампулами совершают качательные движения. Сваренная стекломасса обжигается непосредственно в ампулах. Остывшие ампулы разбивают и извлекают стекло. Эти стёкла очень ядовиты из-за содержания в них мышьяка! Поэтому надо работать с ними в специальной одежде или вытяжных шкафах.

#### 5. Методы выращивания кристаллов из раствора или расплава

Образование и рост кристалла – это сложный физико-химический процесс, связанный со скачкообразным переходом из неупорядоченного состояния вещества (расплава, раствора, пара) в кристаллическую фазу. Переход в кристаллическое состояние происходит при строго определённой для каждого вещества температуре кристаллизации. Необходимое условие начала кристаллизации – нарушение равновесия системы. Например путём переохлаждения или перенасыщения. Процесс кристаллизации состоит из двух этапов:

- 1) Образование кристаллического зародыша;
- 2) Рост зародыша в кристалле.

Очень часто центром кристаллизации является не самопроизвольно образовавшийся зародыш, а инородные частицы (пылинки, примеси, стенки сосуда). Это явление широко используется в технологии выращивания кристаллов, когда в раствор или расплав вводится кристаллик-затравка со строго определённой кристаллографической ориентацией. После появления кристалла-зародыша (введение затравки в жидкую фазу) начинается спонтанное отложение на нём вещества, образующего многогранный кристалл. Выращивание кристаллов осуществляется кристаллизацией из раствора, расплава или газовой фазы.

##### 5.1 Выращивание кристаллов из раствора

Получают кристаллы веществ, образующих пересыщенные растворы. В качестве растворителей применяют воду, ацетон, толуол и щелочные растворы. Условия перенасыщения раствора создают за счёт испарения растворителя, понижения температуры или создания температурного градиента; для выращивания обычно используют затравочные кристаллы. В процессе роста кристалла раствор перемешивают. Этот способ прост, не требует сложного оборудования, но для выращивания оптических кристаллов применяется редко. Более совершенным является гидротермальный синтез, который реализуется с помощью установки, показанной на рис. 9.3.

С помощью этой установки выращивают кристаллы кварца. В автоклав **1** засыпают размельчённый природный кварц **4**, потом заполняют щелочным растворителем и помещают внутрь рамку **2** с затравочными кристаллами. После этого автоклав закрывают и устанавливают в электрическую печь, где раствор нагревают до 400°C. Под действием температуры внутри автоклава образуется давление  $3 \cdot 10^8$  Па. При этих условиях кварц интенсивно растворяется в щёлочи, образуя насыщенный раствор. Температуру в верхней части автоклава поддерживают на 20°C ниже, чем в нижней, поэтому там образуется зона кристаллизации. Благодаря температурному градиенту и перфорационной решётке **3** создаются конвекционные потоки раствора, обеспечивающие его перемешивание и подачу

свежего перенасыщенного раствора в верхнюю кристаллизационную зону автоклава. Скорость роста кристаллов достигает 1мм в сутки. Выращивают кристаллы массой до 800 гр.

## 5.2 Выращивание кристаллов из расплава

*Метод Чохрольского* реализуют с помощью установки, показанной на рис.9.4; применяют для получения кристаллов Ge, Si, GaAs, InAs путём вытягивания их из расплава. Слегка перегретый расплав **4**, помещённый в тигель **5**, опускают монокристалльную затравку **1**, имеющую заданную кристаллографическую ориентацию. Оплавляют поверхность затравочного кристалла для удаления дефектов поверхностного слоя и, регулируя мощность нагревателя **6**, постепенно понижают температуру расплава. Затем затравочный кристалл медленно поднимают вверх, одновременно вращая его с частотой 60 об/мин, что вызывает перемешивание расплава и уменьшение влияния неравномерного распределения температуры в расплаве. Вращающаяся затравка увлекает за собой столбик расплава, который, поднявшись над поверхностью, попадает в зону пониженных температур, где и происходит кристаллизация. Отсутствие контакта кристалла со стенками тигля, возможность наблюдения за процессом роста кристалла, работа под вакуумом или в защищённой среде позволяет получать крупные, совершенные по форме кристаллы, массой до 4 кг.

*Метод Киропулоса.* Выращивают щелочногеллоидные кристаллы из расплава кремния. Установка показана на рис. 9.5. Отличие от метода Чохрольского: фронт кристаллизации расположен под зеркалом расплава. Исходная кристаллическая соль **2** расплавляется в цилиндрическом тигле **4** и нагревается до температуры, на 100°C превышающей температуру плавления. На поверхность перегретого расплава опускают закреплённый на охлаждаемом стержне **6** затравочный кристалл и медленно понижают температуру. В определённый момент на границе раздела "кристалл – расплав " за счёт отвода тепла через стержень создаётся переохлаждение, и на затравке начинает расти монокристалл **1** в радиальном направлении от затравки к стенкам тигля, не распространяясь в глубину. Когда диаметр кристалла достигает размеров, близких к размерам внутреннего диаметра тигля, стержень с растущим кристаллом начинают медленно поднимать, следя за тем, чтобы фронт кристаллизации находился под поверхностью расплава. При выращивании крупных кристаллов необходимость подъёма выращиваемого кристалла отпадает, т. к. уровень расплава понижается за счёт сокращения его объёма при кристаллизации (до17%). Для предотвращения испарений и образования окислов над поверхностью расплава, внутри герметичного кварцевого сосуда **5** поддерживают атмосферное давление инертного газа. Заготовка или расплав вращается с частотой 2об/мин, а в течение суток выращивают кристалл массой до 2 кг.

По *методу Вернейля* выращивают пламенной плавкой кристаллы с температурой плавления 1500 ÷ 2500°C (корунды, титанаты бария, стронций), применяя установку показанную на рис. 9.6. Для выращивания кристаллов в химически чистую окись алюминия  $Al_2O_3$  с добавкой  $Cr_2O_3$  загружают в бункер **2**, предварительно измельчив до частиц размером 1 – 20 мкм. Под действием встряхивающего устройства порошок через сетчатое дно бункера попадает в струю пламени  $H_2 - O_2$  горелки **3**. Снизу через муфель **6** вводится ориентированный затравочный кристалл **5**. Благодаря малым размерам, частицы шихты расплавляются на лету и, попадая на затравочный кристалл, образуют расплавленный слой **4**. Затравка, медленно вращаясь, опускается и, по мере охлаждения расплава происходит кристаллизация и рост кристаллов. Полученные кристаллы отжигают во избежание образования трещин и снятия внутреннего напряжения.

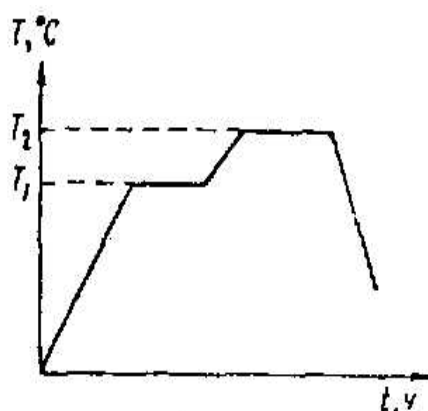


Рис.9.1 График термообработки ситаллов  
наплавки кварцевого стекла

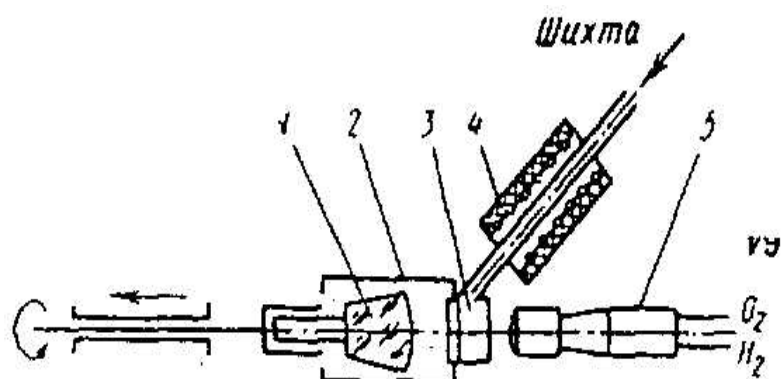


Рис.9.2 Установка

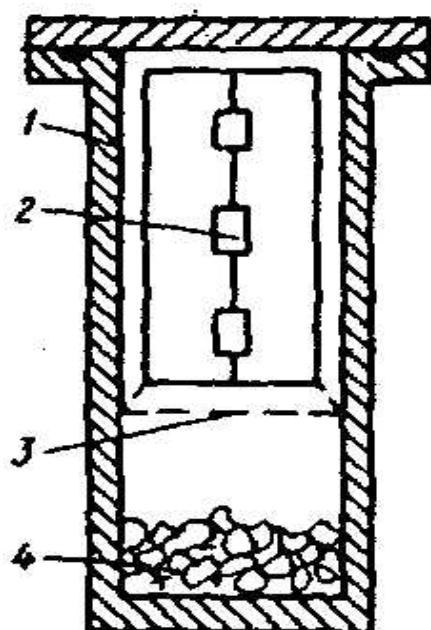


Рис.9.3 Установка гидротермальной  
кристаллизации кварца

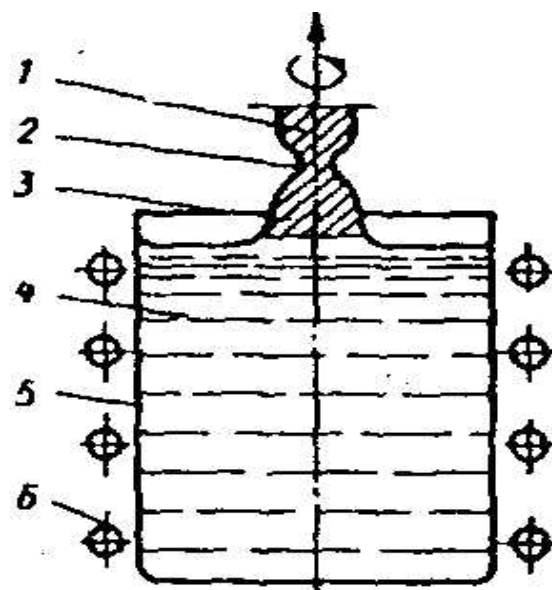


Рис.9.4 Выращивание кристаллов из расплава  
по методу Чохральского

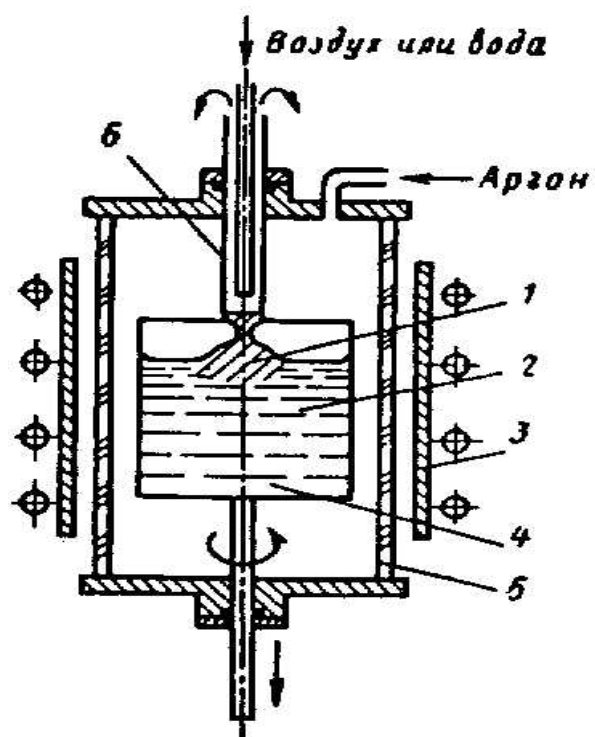


Рис.9.5 Установка для выращивания кристаллов щелочно-галоидных солей

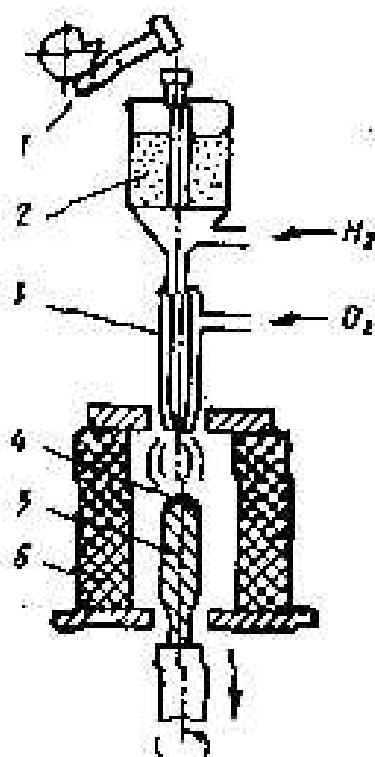


Рис.9.6 Выращивание кристаллов методом Вернейля

## **Лекция 10. Выработка, отжиг и разделка сваренного стекла**

### **1. Отливка в блок и прокатка в лист стекла**

При отливке стекла в блок (рис.10.1) стекло из горшка (2) отливают в разборную металлическую форму (3) установленную на тележке (4). Перед отливкой стекломатериал пристуживают чтобы засвиленные слои стекла остались в горшке. Форму с разлитым горячим стеклом сразу же после отлива помещают в электрическую печь отжига. В зависимости от объема стекловаренного горшка различают стеклоблоки с толщиной 120-300 мм и габаритами в плане 1400×2000 мм.

При прокатке в лист (рис.10.2) стекломатериал из горшка (3) выливают на литейный стол (6) и раскатывают чугунным катком (2). Прокатный лист сталкивают со стола толкателем (1) в печь (5) для отжига. Прокаткой получают листовое стекло толщиной 18-40 мм.

### **2. Выработка в брус и плитку**

С помощью установки (рис. 10.3) оптическое стекло (1) из ванной печи (1) выливают через трубку (2) на металлический холодильник (3) охлаждаемый проточной водой. Слой стекла соприкасающегося со стенками холодильника охлаждается и образует твердую корку соответствующую по форме желобу холодильника (сечение А-А). В начале выработки вручную с помощью металлических захватов придвигают по графитовому желобу (4) где выравнивание температур внутренних и наружных слоев до соприкосновения с роликами вытяжного устройства (5). Далее процесс непрерывен: горячий брус раскалывают на мерные куски длиной 0,8-1,2 м и помещают их в печь отжига. Размеры сечения бруса 30-50 мм, ширина 100-150 мм

### **3. Грубый отжиг стекла**

Грубый отжиг стекла применяют для предотвращения его разрушения при охлаждении и дальнейшей холодной разделке на заготовки. Из-за малой теплопроводности стекла при его охлаждении (нагревании) между наружными и внутренними слоями возникает градиент  $t^\circ = \Delta T$ . Наличие  $\Delta T$  приводит к возникновению напряжений в стекле, значение которых пропорционально скорости охлаждения и квадрату толщины стекла. Пока стекло находится в упругом хрупком состоянии эти напряжения становятся более упругие и исчезают после выравнивания температуры. При нагревании стекла до интервала температур пластической деформации напряжение ослабляется - релаксируется - и через определенное время зависящее от вязкости стекла исчезает, хотя температурный градиент может оставаться. Температурный интервал в котором возможна релаксация напряжений называется областью отжига. При охлаждении стекла нагретого до пластического состояния наличие

температурного градиента приводит к тому что наружные слои затвердевают раньше внутренних и в дальнейшем претерпевают сжатие внутренних более нагретых слоев. Возникающие напряжения при этом не устраняются при выравнивании температур, называются остаточные. Границы области отжига стекла зависят от изменения его температурной вязкости. Верхняя граница ( $T_B$ ) температура при которой вязкость стекла  $10^{+12}$  Па·с, при ней не наблюдается заметной деформации стекла в течении суток. Нижняя граница ( $T_H$ ) - находится на 70-150°C ниже и определяется опытным путем для каждой марки стекла. Отжиг оптического стекла выполняют в камерных электрических печах (рис. 10.4). Такую печь разогревают нагревателем (4) до температуры 200-500°C и с горячим отлитым стеклом устанавливают на подставки (3) и закрывают печь теплоизоляционным колпаком (1). Стекло разогревают до температуры  $T_B+(10-20)^\circ\text{C}$  и выдерживают 4-8 часов. Отжиг стекла в области отжига ответственная операция по строго установленному режиму с постоянной скоростью зависящей от марки стекла и размером отжигаемых заготовок. После ответственного охлаждения стекло можно охлаждать с большей скоростью, при которой возникающие упругие напряжения не приводят к разрушению стекла. Качество горяче-обработанного стекла оценивают по двулучепреломлению образцов, откалываемых от отожженного стеклоблока. Охлажденный блок проверяют визуально для определения качества стекла по пузырям и грубым свиям. В маршрутной карте проводят зарисовки блока в двух проекциях с указанием различных имеющихся дефектов. Полученное стекло в виде блока, листа, бруса - сырьевое стекло - полуфабрикат поступает для дальнейшей холодной разделки на заготовки. На заготовки стекло разделяют раскалыванием, распиливанием.

#### **4. Раскалывание заготовок**

После анализа качества образцов и визуального осмотра производят разметку и разделку сырьевого стекла на заготовки. Разметка комплексная. Сначала выбирают крупногабаритные пластины с высокими требованиями по качеству стекла. Оставшееся стекло делят на более мелкие заготовки, раскалывают на куски для дальнейшей горячей переработки. Раскалыванием получают прямоугольный пласт с размером в плане больше в пять раз толщины блока. Для этого по линии разметки твердосплавным зубилом и молотком делают насечки содержащие линии микротрещин. Потом блок кладут на стол (4) колочного пресса (рис.10.5). При этом ориентируют линию раскалывания (6) по ребру стальной призмы (5). На верхней траверсе (1) пресса - два подвода кулачка (2) расстояние между которыми  $L$  регулируется размерами пластинки. Под призму и кулачки кладут войлочные прокладки (3) толщиной 10-15 мм. При подъеме стола пресса под действием силы блок раскалывается. Припуски на размеры пластин устанавливают с учетом не прямолинейности и увода линии раскалывания, может достигать 30 мм на сторону.

## 5. Распиливание заготовок

Распиливание заготовок более прогрессивный технологический метод разделки сырьевого стекла, выполняют специальным алмазным инструментом: отрезными кругами и полосовыми пилами. Алмазными отрезными кругами распиливают на прямоугольные заготовки, пластины и призмы. Круги бывают трех типов:

- 1) со сплошной режущей кромкой диаметром до 400 мм;
- 2) сегментные диаметром до 800 мм;
- 3) с алмазом нанесенным на режущую кромку закаткой, завальцовкой.

Схема станка для распиливания стеклоблоков дисковыми алмазными кругами (рис.1). На стол (7) через деревянные подкладки укладывают стеклоблок (6). Когда надо отрезать небольшие заготовки на стол (7) ставят упорную пластинку (5) и стеклоблок расклинивают деревянными прокладками. Стол (7) может поворачиваться вокруг вертикальной оси, обеспечивая распиливание блока под различными углами. Шпиндель дискового круга (2) на подвешенной каретке (1) движется по направляющим портала (3) который по направляющим (4) тоже перемещается для установки на размер распиливаемой заготовки по ширине. Полосовыми алмазными пилами разделяют стекло на пластины с габаритным размером не более 250 мм станком (рис.32). Пильная рама (3) с набором полосовых пил (5) совершает возвратно-поступательное движение по направляющим - траверсе (1). Привод движущейся рамы от кривошипно-шатунного механизма(4), число двойных ходов в котором 150-200 в минуту. На пильной раме крепится одновременно до 20 пил при минимальном расстоянии между ними 12 мм. Рабочая подача резания задается перемещением траверса (1) с пильной рамой вниз. Распиливаемый блок (7) крепится на тележке (6), а смазывающе-охлаждающая жидкость подается через устройство (2) в виде душа.

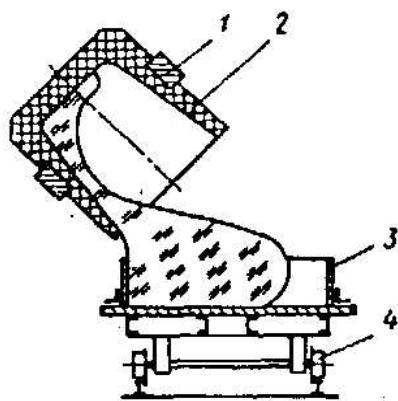


Рис.10.1 Отливка стекла  
в форму

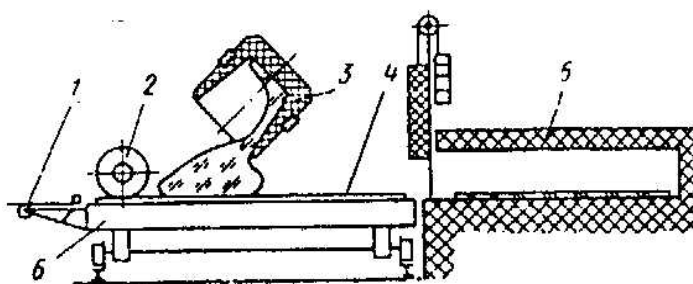


Рис.10.2 Отливка стекла  
в лист

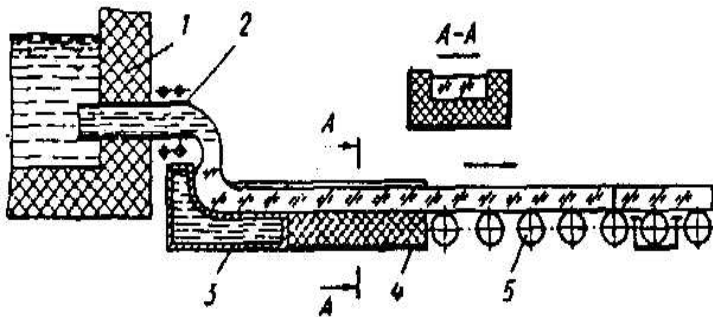


Рис.10.3 Установка для выработки  
стекла в дрот

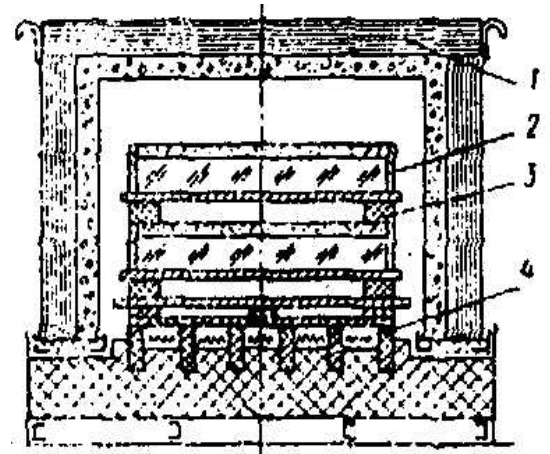


Рис.10.4 Печь отжига блочного стекла

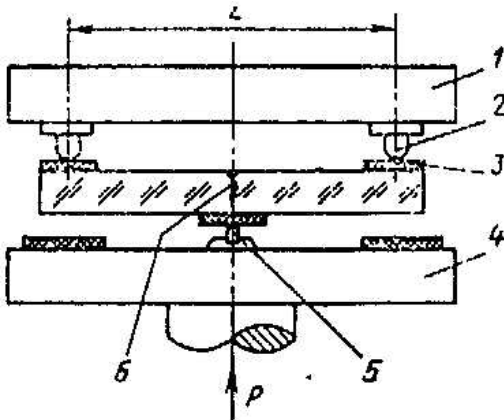


Рис.10.5 Раскалывание стекла на  
алмазным кругом

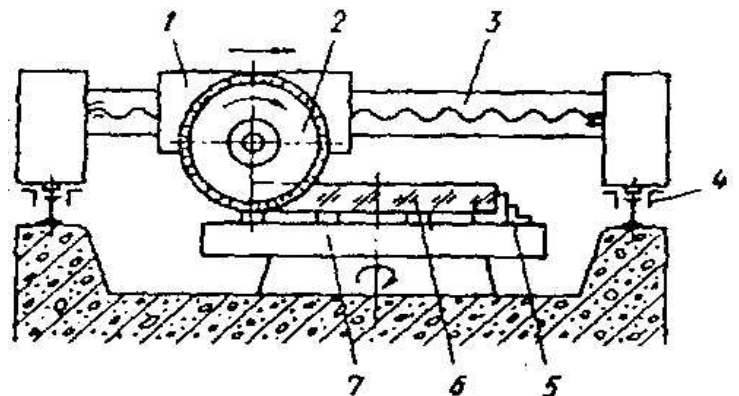


Рис.10.6 Распиливание стекла

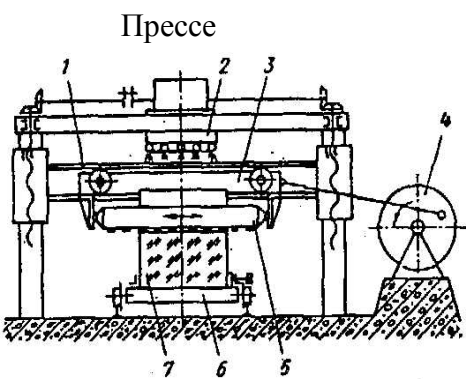


Рис.10.7 Распиливание стекла полосовыми  
пилами

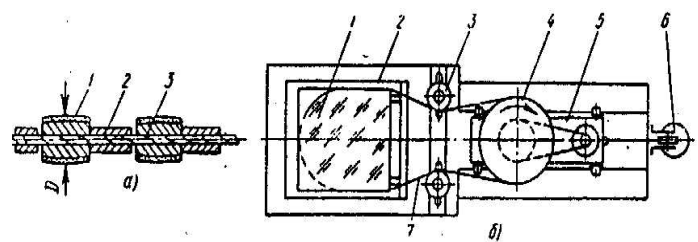


Рис.10.8 Распиливание стекла гибким  
алмазным инструментом



## **Лекция 11. Молирование и прессование заготовок**

### **1. Свободное молирование**

Заготовки серийных оптических деталей (линз, призм, пластин) – изготавливают горячим формованием стекла нагретого до температуры пластичного деформирования. Свободное молирование выполняют по схеме, показанной на рис.11.1. Бесформенные куски стекла, разогретые до состояния текучести, растекаясь под действием силы тяжести, принимают размеры формы, в которую они загружены. При этом объём куска стекла **3** должен соответствовать объёму заготовки **4**. Форма **1** для молирования – металлическая, футерованная керамикой **2**. Перед молированием куски стекла проверяют на отсутствие внутренних дефектов (камней, свилей и др.). Свободное молирование производят на специальных тепловых пеках непрерывного действия. Установлено что экономически целесообразно молировать заготовки массой более 1 кг и размерами в плане 100×100 мм.

### **2. Принудительное молирование**

Выполняют в металлических формах, как показано на рис.11.2. В отличие от свободного молирования, принудительное молирование осуществляется под действием вакуума, создаваемого при откачке насосом воздуха из-под находящейся формы **2** с плоской заготовкой **3**. Если процесс проходит при температуре соответствующей началу пластичной деформации стекла, то микронеровности формы не отпечатываются на молировании поверхности заготовки **1**. Это позволяет получать заготовки сферических и асферических поверхностей не требующие дальнейшей механической обработки. Молирование выполняется на полуавтоматических заготовках, состоящих из кольцевой печи нагрева и туннельной печи отжига, соединённых между собой горячей камерой. Принудительным молированием изготавливаются заготовки диаметром до 600 мм и толщиной до 8 мм.

### **3. Прессование заготовок**

Прессование проводят в закрытой металлической форме для деталей массой до 0,5 кг из предварительно приготовленных нарезок оптических деталей. Нарезки это прямоугольные куски стекла, полученные путём раскалывания плитки сырьевого стекла и имеющий массу равную массе прессовки. Для прессования нарезки предварительно разогревают в электрических или газовых печах до температуры размягчения соответствующей вязкости стекла от  $10^4$  до  $10^6$  Па·с. Во избежание прилипания стекла на печи посыпают мелкодисперсный порошок обожжённого каолина. Разогретая порция стекла переносится из печи в нагретую до температуры равной  $400 \div 600^\circ\text{C}$  пресс-форму гидравлического или пневматического пресса. Формирующие элементы пресс-формы кольцо-матрица **2**, и поддон-выталкиватель **3**. Устройство для прессования заготовок, показанных на рис. 11.3, изготавливается из жаропрочной стали и чугуна. Нарезку укладывают в форму таким образом, чтобы сторона её на полу печи легла вниз на поддон **3**. Отпрессованную заготовку вынимают из пресса и охлаждают, а затем перемешают в печь грубого отжига. Каждую партию заготовок сопровождают паспортом, в котором указана оптическая конструкция стекла и показатели качества заготовок. Другим методом получения прессовок является прессование из жидкой стекломассы, отрезаемой автоматическими ножами от струи стекла вытекающего из фидерного устройства ванной печи. Прессование осуществляется на многопозиционных роторных прессах из штабиков.

*Штабик* – это стеклянный пруток круглого сечения с полированной поверхностью. Штабики получают с помощью устройства, показанного на рис 11.4. Устройство состоит из

печи 1 нагревателя 3 и тигля 2 с донным патрубком. Кусок стекла 7 загружают в тигель и разогревают до температуры размягчения, а после включения нагревателя 4 стекло медленно вытекает из тигля вниз, струя стекла 5 заправленного в ролик 6 вытяжного устройства. При вращении роликов происходит непрерывное вытягивание штабика, с его регулированием температуры патрубка и частотой вращения ролика.

#### 4. Тонкий отжиг стекла

Является последней стадией технологического процесса изготовления заготовок оптических деталей, цель его получить высокую оптическую однородность стекла каждой заготовки с едиными для всей партии показателями преломления и дисперсией. Тонкий отжиг в электрических камерных печах, схема построена на рис.11.5. Такая печь имеет высокую теплоизолирующую крышку 3 и систему нагревателей 4, обеспечивающих равномерный нагрев и принудительное снижение температуры. Заготовки 5 укладывают в массивные насыпи 1, способствующие уменьшению градиентов температуры печи. Управление процессом нагрева и охлаждения заготовки производится автоматически по температурному графику, показанному на рис.11.6. Температурный график подразделён на: нагрев; выдержка; ответственное охлаждение; остывание.

В процессе тонкого отжига заготовки сначала нагревают до верхней температуры отжига с возможно большой скоростью, затем дают выдержку при постоянной температуре. Во время выдержки происходит релаксация- уничтожение остаточных механических напряжений в стекле. Ответственное охлаждение в интервале температур от  $T_v$  до  $T_n$  производится с постоянной скоростью. Скорость ответственного охлаждения зависит от размеров заготовки и требования к ним по двойным лучепреломлениям, показателю преломления, дисперсии. Обычно скорость охлаждения выбирают в пределах от 0,05 до 20°С/ч. После ответственного охлаждения заготовку увеличивают, для чего постепенно приоткрывают колпак печи. Изменяя скорость охлаждения в интервале ответственного охлаждения можно в определённых пределах изменить значения коэффициента преломления и дисперсии для данной партии заготовок.

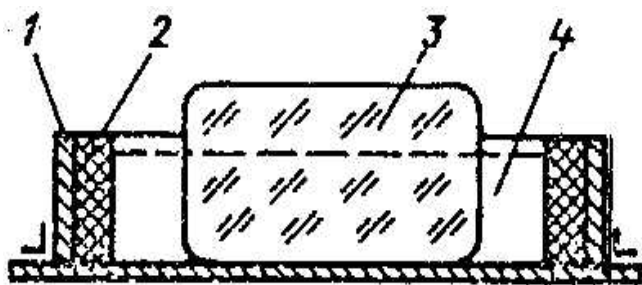


Рис.11.1 Свободное моллирование

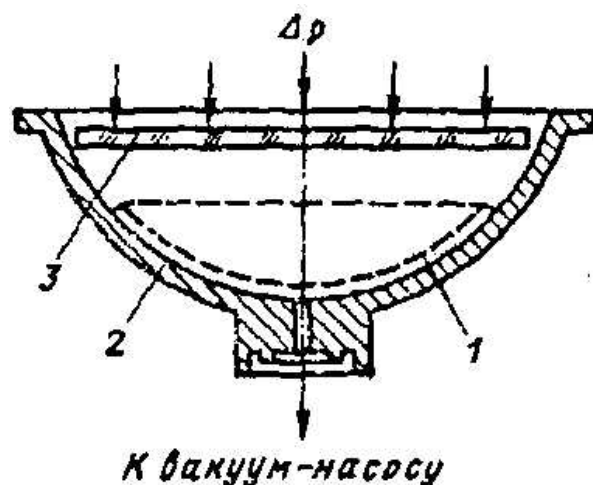


Рис.11.2 Принудительное моллирование

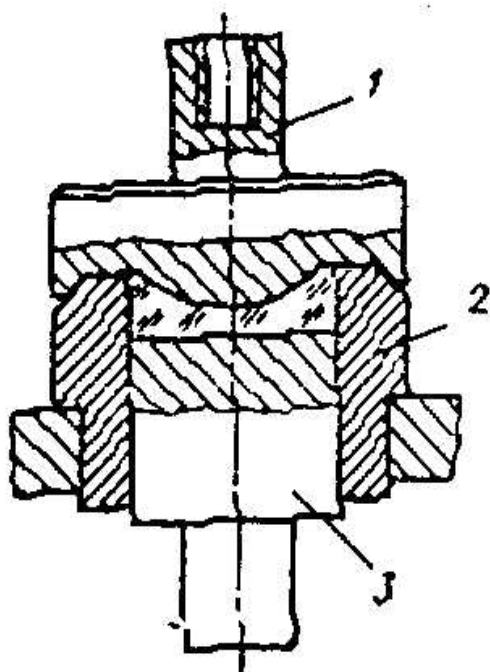


Рис.11.3 Прессование заготовок линз

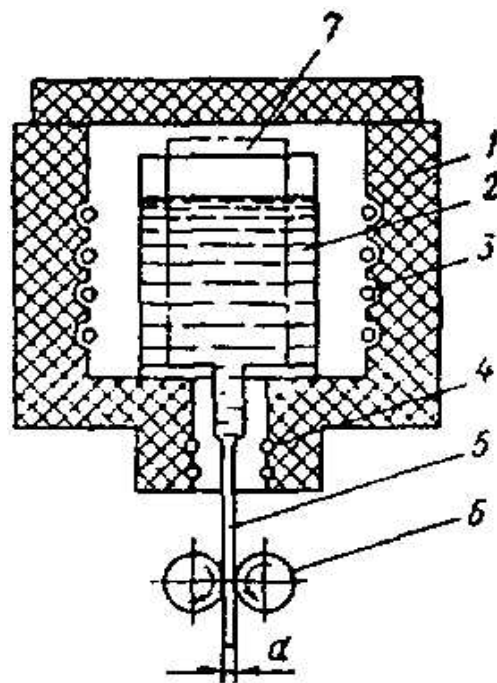


Рис.11.4 Вытягивание штабиков

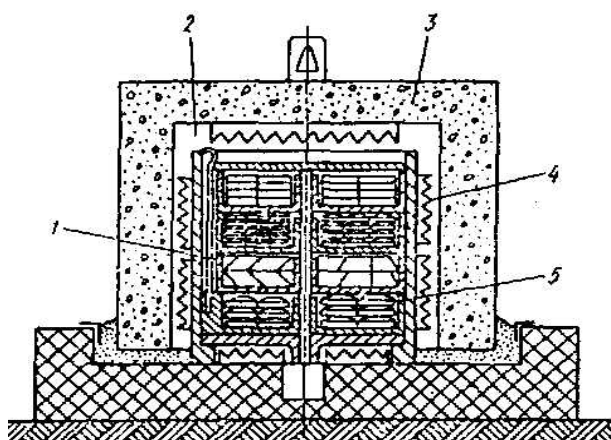


Рис.11.5 Печь тонкого отжига стекла

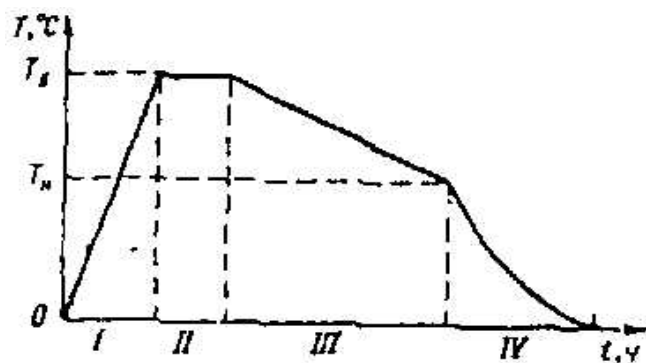


Рис.11.6 Температурный график тонкого отжига :  
1-нагрев; 2-выдержка; 3-ответственное охлаждение; 4-охлаждение

## Лекція 12. Правила та вимоги складання креслення оптичних деталей

### 1. Основні правила складання креслень оптичних деталей

Оптичні деталі зображуються на кресленнях у відповідності до загальних правил встановлених СКД. Креслення повністю характеризує оптичну деталь та є вихідним документом для розробки технологічного процесу її виготовлення та контролю. При зображенні оптичної деталі використовують загальні правила машинобудівного та приладобудівного креслення, але із-за специфіки її службового значення задають деякі доповнення, а також виконання особливих нормативних вимог. Приклади виконання креслень деяких оптичних деталей показані на Мал. 12.1-12.5. Наведемо деякі особливості виконання креслення оптичних деталей:

- деталі розміщуються на кресленнях у напрямку розповсюдження світла зліва направо;
- числове значення радіусів сферичних поверхонь позначають буквою  $R$ .
- асферичні поверхні визначають рівнянням кривої поверхні обертання;
- циліндричні поверхні задають значенням радіуса  $R$  перед яким пишуть слово "Циліндр".
- у правому верхньому кутку креслення розміщують таблицю в якій вказують: вимоги до матеріалу, вимоги до деталі, розрахункові данні;
- у полі креслення і примітках вказують додаткові конструктивні особливості та технологічні вимоги, наприклад: штрихів та цифр у збільшеному масштабі з вказуванням розмірів, визначення виду покриття та його шифру, розмір світлового діаметру, розміри для довідок із зірочкою, тощо.

- у штампі обов'язково пишуть найменування деталі, марку скла і ГОСТ, масу деталі, масштаб креслення;
- для збірних одиниць таблиця складається із вимог до виробу і оптичних характеристик;
- на кресленнях збірних одиниць склеювану поверхню виділяють лінією подвійної товщини і вказують стрілкою з буквою К в її розриві.

За кресленням деталі розроблюють креслення заготовки для прийнятого технологічного процесу. На цьому кресленні вказують допуски на обробку, чистові розміри деталі і вимоги до матеріалу. Креслення заготовки необхідне для замовлення напівфабрикату (частини або пресованої заготовки) з скло-заводу. При розробці технологічного процесу складають поопераційні ескізи заготовки на окремі операції. Значення оптичних характеристик, визначених при габаритному розрахунку системи вказують у таблиці, а при підготовці виробництва технологи не повинні їх передивлятися.

## 2. Показники якості деталей

Наявність або відсутність певного показника в таблиці вимог до деталей має для процесу виготовлення достатньо визначений технологічний зміст. Числові значення показників якості обумовлюють трудомісткість і складність виконання операції технологічного процесу обробки деталі.

Гранично допустимі відхилення стрілки кривизни  $N_A$ ,  $N_B$  виконуючих оптичних поверхонь А і Б від стрілки кривизни поверхні пробного скла задають в числах (мал. 12.1  $N_A=5$  і  $N_B=3$ ) інтерференційних кілець або смужок, які збігаються з діаметром  $D$ , або з найменшим розміром деталі при контролі пробним склом. У виробничих умовах інтерференційну картину звичайно, називають “кольором”, так як при освітленні білим світлом лінії мають райдужне забарвлення.

Розміри сферичної поверхні задані на кресленні як  $R \pm \Delta R$  мм, вимірюють побічним методом через відхилення кривизни полірованої оптичної поверхні деталі від вимірювальної бази – робочої поверхні пробного скла (оптичного калібру). Вимірювання  $N$  надійні якщо оброблювальна поверхня має правильну сферичну форму. Показникам  $N_A$  і  $N_B$  прямопропорційні відхилення кривизни

поверхні від заданих розрахунком. Якщо діаметр деталі  $D$  більше діаметра пробного скла  $D_{np.cm}$ , то для сферичної поверхні справедлива формула перерахунку:

$$N_D = \left(\frac{D}{D_{np.cm}}\right)^2 N_{np.cm}. \quad (12.1)$$

Перерахунок зменшує надійність результатів вимірювань, так як помилка у вимірюванні  $N$  пробним склом збільшується при  $D_{np.cm} < D$  пропорційно відношенню  $\left(\frac{D}{D_{np.cm}}\right)^2$ . У деяких випадках  $N$  і  $\Delta N$  вказують із знаками плюс, або мінус. Це означає, що спостерігається повітряний проміжок на краю, а дотик в центрі при знаку плюс і проміжок в центрі, а дотик на краю при знаку мінус (мал. 12.6).

У виробничих умовах відхилення першого випадку прийнято називати загальний бугор, а другого – загальна яма. Для плоскої поверхні це означає, що при знаку плюс вона злегка випукла, а при знаку мінус злегка увігнута. Показники  $N_A$  і  $N_B$  при знаку плюс, або мінус можуть бути чисельно рівні, але інтерференційна картини буде різна. При знаку плюс лінії сходяться до точки прикладення сили натиску  $P$ , зберігаючи вигнутість, а червоне забарвлення знаходиться в середині лінії. Таку картину називають не яма, а мілкий колір. Для плоских поверхонь загальні поняття “бугор” і “яма” зберігають своє значення.

Вимірювання значень показників  $N_A$  і  $N_B$  не залежить від того, замикаються інтерференційні лінії у кільця або зображуються скривленими смугами, і не залежить від симетричності розміщення картини відносно центру деталі. Значення  $N_A$  і  $N_B$  визначають по числу кілець, які ми бачимо на площі деталі під пробним склом (на мал. 12.7  $N=3$ ), або у відношенні  $\frac{\Delta t}{t}$  яке визначає вигнутість лінії  $N=0,4$ . Значення  $N_A$  і  $N_B$  можуть бути менше 1 і виражатися дробними числами. В таких випадках оцінку загального відхилення кривизни оброблювальної поверхні від вимірювальної поверхні пробного скла ведуть по

забарвленню райдужних кольорів інтерференційних ліній, так як повного кільця не видно.

Значенням  $N_A$  і  $N_B$  пропорційне товщі шару скла, який потрібно полірувати, щоб зробити відхилення кривизни поверхні менше. Товща цього шару по осі збільшується пропорційно квадрату діаметра деталі. Труднощі обробки в процесі полірування у зв'язку з цим зростають пропорційно квадрату або кубу діаметра деталі, а полірування виконується приблизно в 20 разів повільніше шліфовки. Якщо на інтерференційній картині кільця витягнуті в одному і стиснуті в іншому напрямку, то є загальне відхилення форми поверхні від сферичної. Це відхилення називають астигматичністю поверхні. Геометрично це означає, що оптична поверхня скла є сфероциліндричною (на мал. 12.8  $N=1$ ). Значення астигматичності визначається як різниця кілець  $N$  по осям I-I і II-II.

Значну частину допустимих граничних значень  $N_A$  і  $N_B$  складають відхилення, що виникають при обробці, а також внаслідок вибраного способу кріплення заготовки. Наприклад, при еластичному способі блокування можна одержати  $N>1$ , а при твердому блокуванні можна одержати тільки  $N>3$ .

Гранично допустимі відхилення радіусів пробних скелець (калібрів)  $\Delta R_A$  і  $\Delta R_B$  згідно з ГОСТом 2412-81, або  $\Delta r_A$  і  $\Delta r_B$ , згідно з ГОСТом 2786-82 (на мал. 12.1  $\Delta R_A=\pm 0,1\%$ , і  $\Delta R_B=\pm 0,05\%$ ), задають в мікрометрах, або у відсотках від значення номінальних радіусів, або в долях інтерференційних смуг для плоских поверхонь. Гранично допустимі відхилення форми виконуючих оптичних поверхонь А і Б ( $\Delta N_A=0,5$  на рис. 12.3 та  $\Delta N_B=0,3$  на мал. 12.4) обчислюють для діаметра деталі:

$$\Delta N_D = \left(\frac{D}{L}\right)^2 \Delta N_M = \left(\frac{D}{D_M}\right)^2 \Delta N_M \quad (12.2)$$

де  $L, D, N$  – довжина, діаметр, значення окремої помилки. Помилки форми бувають двох видів: загальні і місцеві.

Загальні помилки форми – це утворення сфероциліндричної поверхні, яка в кожній точці має подвійну кривизну. Це викликає появу астигматизму, а під пробним склом з’являються витягнуті кільця або дуги, які не утворюють частин кола. Відхилення кривизни поверхонь від заданої визначається формулою:

$$\Delta\rho = \frac{4\Delta N\lambda}{D^2} = \frac{\Delta R}{R^2} \quad (12.3)$$

Окремі помилки форми бувають зональні, тобто симетричні відносно вершини сферичного сегмента, або несиметричні в різних місцях поверхні, як на малюнку 12.9. Як загальні так і окремі помилки форми оптичних поверхонь зменшують роздільну здатність системи, що не компенсується розмірами товщини і радіусів лінз, повітряних проміжків. Тому підхід до припустимих значень  $\Delta N$  вимогливіший, ніж до  $N$ .

Граничні відхилення  $\Delta N$  завжди призначають в долях  $N$ . До того ж при звичайних цехових спостереженнях інтерференційної картини під пробним склом око не може розрізнити помилки менше 10%  $N$  і результати вимірювання стають не надійними.

Зональні помилки виявляються як зміна відстані між інтерференційними кільцями, або, якщо картину орієнтувати на смуги, що лежать поперек напрямку відхилення поверхні, як місцевий вигин смуг (мал. 12.9).

Окремі помилки виникають як результат різкої невідповідності розмірів інструменту та оброблювальної поверхні, грубих помилок в налагодженні верстата, наявності неоднорідностей і різнотемпературності матеріалів, які взаємно притираються.

Гранично допустимі дефекти чистоти полірування  $P_A$  і  $P_B$  задають в класах чистоти оптичних поверхонь згідно з ГОСТ 11141-84.

Всі поліровані поверхні мають шорсткість 13 і 14 класів згідно з ГОСТ 2789-73, яку визначають відповідно  $R_z^{0,1\sqrt{}}$  і  $R_z^{0,05\sqrt{}}$ . Згідно з ГОСТ 11141-84 встановлені додатково більш жорсткі вимоги до чистоти виконуючих поверхонь оптичних деталей, обумовлені розміри і число дефектів – подряпин і



точок. Вимоги регламентовані 9-ма класами Р – від 9 до 2 для поверхонь, віддалених від площини зображення, і ще більш жорстким класом Р1 з підрозділами 1-40, 1-20 і 1-10 для поверхонь, розташованих в площинах зображення предметів. Наприклад, по класу Р підрозділами 1-10 дозволяється ширина подряпини 0,002 і діаметр точки 0,004 мм. Останні вимоги такі жорсткі, що обумовлюються кругові середня і крайова зони діаметром  $1/3$  і  $2/3$  світлового діаметра, в яких дефекти допускаються, а в центральній їх не повинно бути.

Гранично допустимі відхилення від центричності лінз С задають в долях міліметра. Значення С вказують на величину паралельного зміщення геометричної осі симетрії допоміжної складальної циліндричної поверхні від оптичної осі виконуючих поверхонь лінзи. Це допуск на взаємне розташування двох виконуючих і однієї допоміжної поверхні лінз: їх відносний поворот, або зміщення. Децентрована лінза ніби складена із правильної лінзи і сферичного клину з кутом  $\sigma$ , який обумовлює різну товщину краю лінзи. На кресленні її задають допуском С, перетворюючи до децентрованості другого роду паралельним зміщенням осей. Децентрованість лінз викликає появу аберацій коми, астигматизму і поперечного хроматизму. Виникає децентрованість на перших операціях поштучної обробки і при блокуванні лінз через помилки базування при встановленні заготовок. Децентрованість зменшують до допустимих значень круглим шліфуванням на операції, яку виконують після полірування іншого боку лінзи.

Показники якості виготовлення призм  $N_A$ ,  $\Delta N_A$ ,  $N_B$ ,  $\Delta N_B$ , Р мають такий самий зміст, що і для лінз. Гранично допустимі значення пірамідальності призми задають в кутовій мірі. Пірамідальність - це непаралельність ребер призми, яку висловлюють допуском  $\pi$ , або непаралельність ребра одного із кутів до зовнішніх виконавчих граней в головному перерізі призми. Для прямокутної призми - це непаралельність ребра прямого кута гіпотенузової грані. Пірамідальність являє собою допуск на взаємне розташування оптичних

поверхонь призми: їх відносний поворот. При цьому роздільна здатність призми зменшується. Пірамідальність виникає із-за похибки обробки і технологічного базування.

Гранично допустимі відхилення кутів призми визначають в кутовій мірі.

Якщо  $\sigma_{45} \neq 0$ , то призма не розгортається в плоскопаралельну пластину. Клин пластини відхиляє промені від розрахункових напрямків і вносить хроматизм. В цих умовах назначають допустиме значення  $\sigma_{45}$ . Різниця гострих кутів призми виникає із-за похибки обробки і технологічного базування.

Допустиме значення границі роздільної здатності  $\varepsilon$  визначають в кутових секундах. Значення визначає вплив однорідності подвійного променезаломлення, бессвільності скла, а також вплив значень на роздільну здатність призми (Мал. 12.3,  $\varepsilon=30''$ ).

Довжина ходу променя  $L$  в призмі визначається габаритним розрахунком деталі.

Показники якості виготовлення клинів  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$  та інші мають такий само зміст, як для лінз і призми, додається тільки  $\sigma$ . Кут відхилення променя визначають в кутових значеннях, на які назначають гранично допустимі відхилення.

Світловий діаметр деталі св.  $\varnothing$  визначають в міліметрах.

Показники якості виготовлення сіток  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$ , мають такий самий зміст, як і для клинів. Гранично допустиме значення клиновидності  $\theta$  визначають в кутових секундах, або хвилинах.

Відхилення кута клина, або клиновидність плоскопаралельної пластини виникають за рахунок похибки технологічного базування і обробки.

Для сіток гранично допустимі відхилення штрихів по ширині, різниця ширини, відстань між ними, а також шрифту написів, запуску фарбою і травлення вказують в полі креслення у вигляді приміток.

Значення  $f'$ ,  $S_F$ ,  $S'_F$ , св.  $\varnothing$ . вказані згідно з даними габаритного розрахунку для складання таблиць комплектації лінз та перевірки оптичних параметрів

збірної одиниці. На одній із величин, яка є замикаючою ланкою розмірного ланцюга, вказують граничне відхилення.

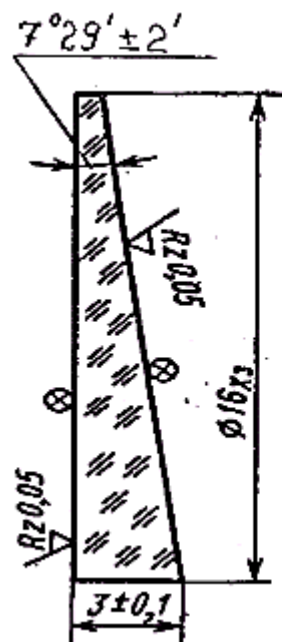
Крім перерахованих головних показників якості виготовлення, до оптичних деталей пред'являють і додаткові вимоги, але останні задають не так часто. Гранично допустимі відхилення, вказані в таблицях вимог до деталей як показники якості, відображають сумарну дію похибок технічного базування, обробки, вимірювань. Сумарні похибки, незалежно від чого вони одержані, складаються за правилом максимуму, мінімуму або ймовірно і не повинні перевищувати значення граничних відхилень, вказаних в таблицях вимог до деталей. В навчальних розрахунках дозволяється використовувати приблизні допустимі значення граничних відхилень (табл. 12.1), що призначаються як показники якості оптичних деталей.

**Таблиця 12.1**

Елементи оптичних приладів	Допустимі відхилення оптичних поверхонь		
	За кривизною N	За формою $\Delta N$	За дефектами чистоти
Об'єктиви:			
коліматорів і астрономічні	1-3	0,2-0,3	<b>7- 8</b>
<b>телескопічні</b>	3-5	0,3	4-5
аерофотознімальні	1-3	0,1-0,5	5-6
фотографічні	3-5	0,3-0,5	5-6
Мікроскопів до $10^x$	2-3	0,2-0,5	3
від $10^x$ до $40^x$	1-2	0,1-0,2	2
більш $40^x$	0,5-1,0	0,05-0,1	2
Окуляри, лупи	3-5	0,5-0,8	3
Призми: відбиваючі поверхні	0,5-1,0	0,1-0,3	2-3

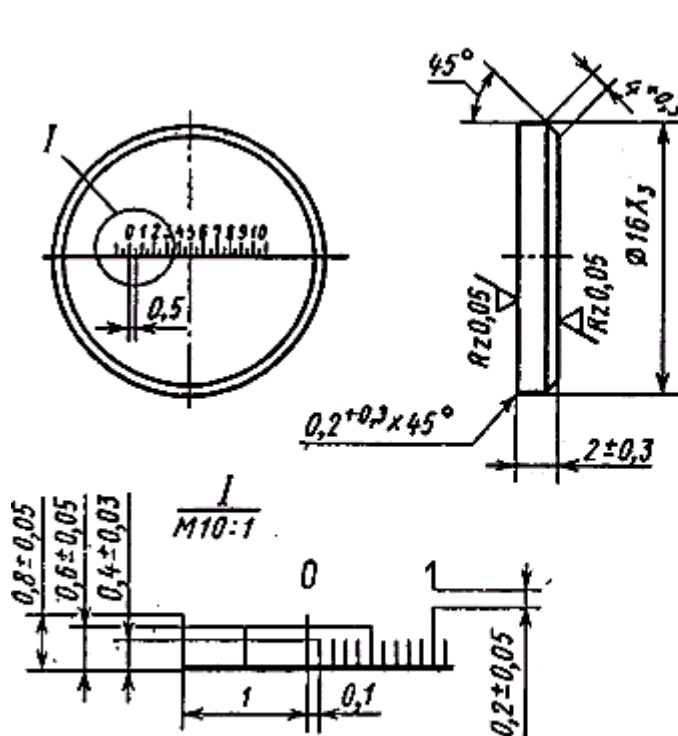






$\Delta n_e$	—
$\Delta(n_F - n_C)$	—
Однорідність	2
Подвійне променезалом	1
Світлопоглинання	2
Бессвильність	1В
Пузирність	5Г
$N$	3
$\Delta N$	0,5
$\rho$	У
$\sigma$	$7^\circ 29' \pm 2'$
св.ф	44

Мал. 12.4. Приклад виконання креслення клина оптичного

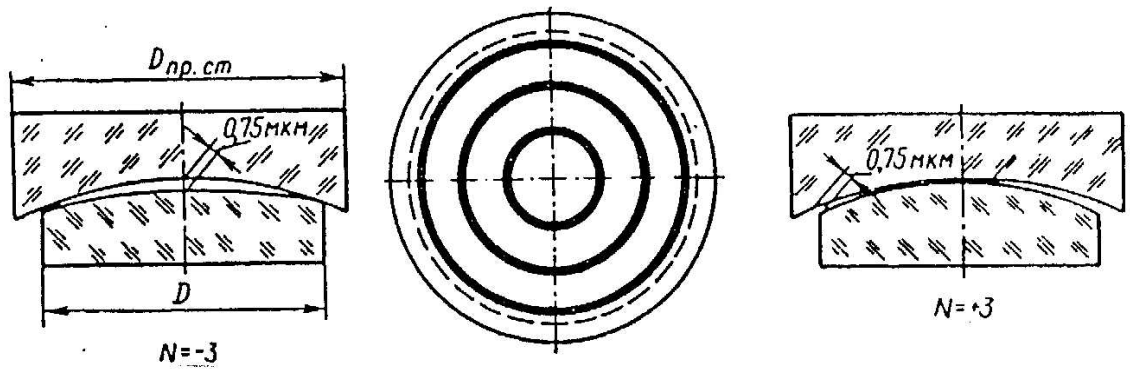


$25/(\nabla)$

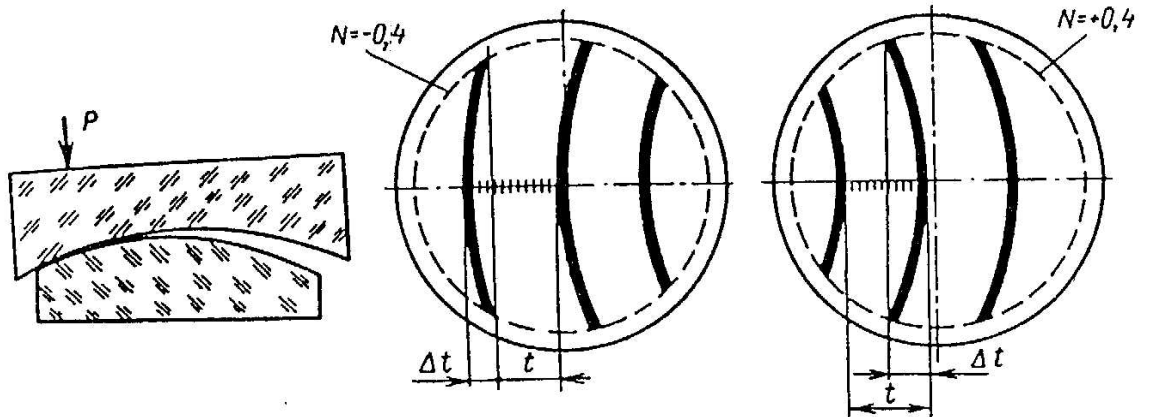
$\Delta n_e$	4В
$\Delta(n_F - n_C)$	4В
Однорідність	4
Подвійне променезалом	3
Світлопоглинання	3
Бессвильність	2В
Пузирність	1Д
$N$	—
$\Delta N$	—
$\rho$	I-20
$\theta$	15'
св.ф	14

1. Ширина штрихів  $0,05 \pm 0,003$  мм.  
 2. Разність штрихів по ширині деталі не більше  $0,003$  мм.

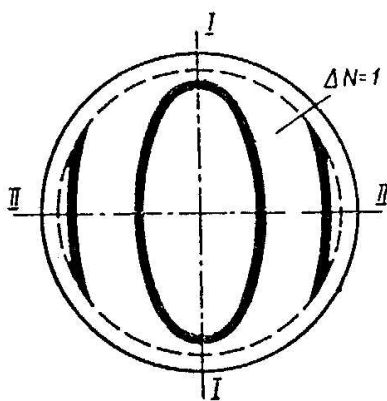
Мал. 12.5. Приклад виконання креслення сітки



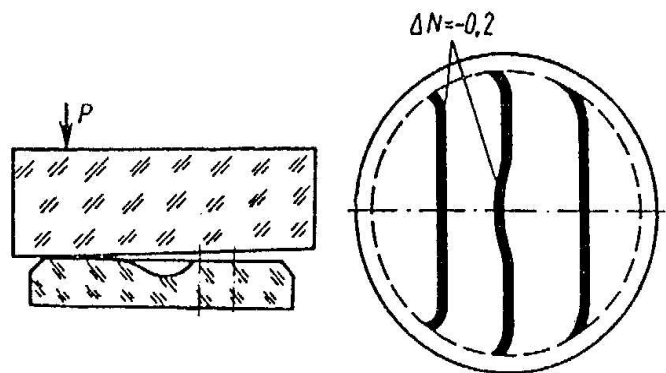
Мал. 12.6. Схема вимірювання відхилень кривизни пробним склом



Мал. 12.7. Схема підрахунку інтерференційних смуг при вимірюванні кривизни пробним склом



Мал. 12.8. Вигляд інтерференційної картини при вимірюванні сфероциліндричної поверхні.



Мал. 12.9. Вимірювання місцевих похибок кривизни поверхні

## Лекция 13. Шлифование и полирование оптических поверхностей

### 1. Шлифование закреплёнными абразивными зёрнами

Обработку стекла инструментами с закреплёнными абразивными зёрнами применяют для удаления наибольшей части объёма припуска и готовят поверхности для последующего тонкого шлифования суспензиями абразивных порошков и окончательного полирования оптических поверхностей.

Шлифование стекла закреплёнными абразивными зёрнами очень похоже на шлифование металлов на металлорежущих станках. Действие единичного закреплённого зерна приводит к скалыванию частиц хрупкого стекла под действием тангенциальных сил, направленных под малым углом к поверхности. Стекло разрушается как хрупкий материал растрескиваясь и откалываясь мелкими частицами неправильной формы.

При шлифовании главное движение инструмента – вращательное, а обрабатываемой заготовки – возвратно-поступательное. Схема работы единичного закреплённого абразивного зерна показана на рис.13.1. При взаимодействии зерна со стеклом образуется нарушенный слой толщиной  $n$ , состоящий из поверхностных неровностей толщиной  $k$  и, лежащего под ними трещиноватого слоя  $m$ . Структура рельефного слоя состоит из впадин и выступов, имеющих при вершине угол  $\approx 150^\circ$ .

Из рельефного слоя удалена приблизительно половина объёма стекла, а оставшаяся часть представлена в виде выступов. Толщина слоя стекла, снимаемого за один проход инструмента определяется геометрически замкнутой размерной цепью, имеющей звено  $a$  между установочными базами инструмента и стекла, диаметром  $D$  инструмента, высотой  $l$  заготовки, размером  $h$  частицы, выступающей из связки абразивных зёрен обрабатывающего инструмента.

Между поверхностями стекла и материалом связки шлифовального круга, из которого выступают абразивные зёрна, обязательно должен быть зазор, который обеспечивает подачу смазывающе-охлаждающей жидкости и отсутствие вредного трения связки по стеклу, приводящего к выделению большого количества тепла. Таким образом, часть зерна, взаимодействующая со стеклом, составляет менее 1/3 его наибольшего размера.

Объём удаляемого припуска зависит от хрупкости, твёрдости, прочности абразивных зёрен и материала связки и пропорционален интенсивности режима обработки. На зерно действует сила резания  $R$ , создаваемая в относительном движении инструмента и стекла и разрушает последнее. Составляющая  $F_k$  силы  $R$  направлена под углом  $180^\circ$  к вектору относительной скорости  $V_{отн}$ , лежащему в плоскости, касательной к обрабатываемой поверхности. Силе  $F_k$  пропорциональна работа, идущая на удаление стекла и выделение тепла.

Под воздействием силы  $F_n$  абразивное зерно проникает в толщу и разрушает стекло, вызывая появление конических трещин. Закреплённые зёрна со временем затупляются, усилие резания увеличивается. Тогда в работу вступают новые зёрна и процесс шлифования идёт с равномерной интенсивностью. Обработка закреплёнными абразивными зёрнами есть наиболее эффективный процесс обработки стекла в оптических технологиях.

Эффективность шлифования стекла закреплёнными абразивными зёрнами обусловлена следующими обстоятельствами:

- 1) Закреплённые абразивные зёрна работают как резцы, оставляя на обрабатываемой поверхности стекла сплошные пересекающиеся царапины;
- 2) Закреплённые зёрна разрушаются только при воздействии на стекло, но не от перетирания одно о другое;



- 3) Рабочее давление инструмента сосредотачивается на небольшом числе зёрен, выступающих из связки;
- 4) Скорость резания составляет 15 – 25 м/с, а рабочее давление  $10^6$  Па;
- 5) Неоднородность размеров зёрен не проявляется, поскольку они работают только частью, выступающей из связки;
- 6) Обильная подача эффективно удаляет разрушенное стекло и тепло;
- 7) При работе с малыми подачами образуются малые микронеровности поверхности даже при использовании инструмента с зёрнами крупной зернистости.

Производительность обработки закреплёнными зёрнами определяется объёмом припуска удалённого за единицу времени.

## 2. Шлифование суспензиями абразивных порошков

Обработка суспензиями абразивных порошков подготавливает исполнительную поверхность оптической детали к последующему полированию до требуемых значений параметров  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $R$ . Шлифующая суспензия представляет собой смесь порошка абразивных зёрен и жидкости. Разрушение стекла происходит под действием абразивных зёрен передающим вибрационно-ударным действием кинетическую энергию инструмента на обрабатываемую поверхность стекла. Стекло разрушается абразивными зёрнами и взамен исходной, образовывается новая поверхность с более совершенными параметрами качества. Применяются порошки зёрна которых по сравнению со стеклом имеют большую твёрдость, такими являются:

- 1) карборундовые;
- 2) корундовые;
- 3) наждачные;
- 4) кварцевые;
- 5) алмазные.

Порошки этих молекул обладают абразивными свойствами, т.е. при раскалывании они образуют более мелкие частицы имеющие также острые грани.

При шлифовании зёрна вместе с водой находятся между рабочей поверхностью металлического инструмента и обрабатываемой поверхностью стекла. Схема работы абразивного зерна показана на рис.13.2.

Относительное движение стекло-инструмент происходит при некотором нажиме верхнего звена  $Q$  на нижнее и плюс сила  $P$  давления поводка станка. Причём зёрна перекатываются или проскальзывают с некоторой скоростью  $V_{отн}$ . Наиболее крупные зёрна взаимодействуют со стеклом и инструментом. Стекло разрушается, а инструмент изнашивается. Более мелкие зёрна переносятся водой до тех пор пока крупные не раздробятся после чего мелкие зёрна вступают во взаимодействие со стеклом и инструментом. В относительном перемещении кинетическая энергия инструмента **1** передаётся стеклу **2** через действие абразивного зерна **3**. Приложение нагрузки к отдельному зерну имеет резко выраженный динамический характер.

Динамическая сила  $R$  направлена по линии  $aa'$  соединяемой вершины зерна, одна из которых мгновенно закрепляется в матрице шлифовальника, более вязком чем стекло, а другая вершина воздействует на стекло. Сила  $F_n$  направлена перпендикулярно вектору относительной скорости  $V_{отн}$  и не может производить работу по удалению слоя припуска. Сила  $F_n$  обеспечивает лишь контакт между шлифовальником, абразивным зерном и стеклом, вызывая появление трещин стекла и упругих деформаций инструмента, раздавливая выступы поверхностных неровностей стекла.

Сила  $F_n$  направлена касательно к обрабатываемой поверхности и противоположна вектору относительной скорости. Она вызывает скалывание вершин поверхностных неровностей стекла и изнашивание рабочей поверхности инструмента. В работе разрушения стекла участвуют около 15% зёрен одновременно находящиеся под шлифовальником. Другие зёрна не участвуют, они или вымываются водой из рабочего пространства под инструментом, или перетираются между собой измельчаясь.

Удаление припуска происходит постепенно, путём проникания инструмента в толщу стекла по направлению перпендикулярно к обрабатываемой поверхности. Смену зернистости абразивных порошков называют переходом. Так поверхность подготавливают к последующей операции – полированию.

### 3. Полирование оптической поверхности

Цель полирования заключается в том, чтобы придать используемой поверхности требуемую прозрачность и значения  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$ . Процесс полирования стекла водными суспензиями полирующих порошков имеет более сложную, чем шлифовальные физико-химическую природу. При полировании требуется достичь шероховатости поверхности не более 3-5 сотых долей мкм. В соответствии с ГОСТ 2789-73.

Наружный рельефный слой, образованный шлифованием, удаляется полированием полностью, а трещиноватый частично остаётся, но трещины на поверхности заполировываются частицами гидролизованного стекла и не мешают прохождению света через него.

Внешне картина процесса полирования происходит так. Зёрна полирующего порошка, состоящего главным образом из окислов церия или железа, имеют размеры 0,2 – 2 мкм, они взвешены в воде и находятся между притирающими поверхностями полировальника и стекла.

По сравнению со шлифующими, зёрна полирующих порошков имеют меньшую твёрдость и менее резко выраженные абразивные свойства самозатачивания при раскалывании. О раскалывании и притуплении зёрен полирующих порошков, в большинстве случаев имеющих размеры 0,2 – 1,0 мкм, можно судить лишь по второстепенным косвенным признакам.

Полировальник имеет смоляной рабочий слой. Площадки поверхностных неровностей шлифованной поверхности стекла и смоляной поверхности полировальника значительно больше размеров зёрен полирующего порошка. Но на стекле неровности шлифованной поверхности имеют микрогеометрическую характеристику, а на смоле – макрогеометрическую. Рабочая поверхность вязкого смоляного полировальника, пластически деформируясь, выравнивается по микронеровностям шлифованной поверхности.

Вода, в которой взвешены зёрна, в первые моменты подачи суспензии оказывает гидростатическое противодействие наружу, а затем растекается и зёрна закрепляются, адсорбируясь в наружном слое смолы. Часть зёрен, ещё не закрепившихся в смоле, перекачивается, или закрепившись на мгновение, продолжает движение по направлению вектора относительной скорости  $\vec{V}_{отн}$ .

Зёрна срезают вершины рельефного слоя, которые сразу становятся гладкими полированными. В дальнейшем размеры полированных площадок увеличиваются, высота неровностей уменьшается до свойственных 13-14му классам шероховатости.

Перекачиваемые зёрна, закрепляясь (адсорбируясь) в смоле, и одновременно в остатках каверн, порах и бороздах, на отполированных элементарных площадках стекла как бы склеивают их с поверхностью полировальника и в дальнейшем при относительном

перемещении сдирают кусочки коллоидной плёнки, образующейся на поверхности стекла под химическим воздействием воды.

Остаточные неровности полированной поверхности меньше 0,03 мкм, т.е. меньше длины волны видимого излучения, так как размер части зерна, проникающей в стекло, не превышает 0,3 мкм.

Пластические свойства смолы, удерживающей зёрна, и коллоидной плёнки способствуют тому, что работа зёрен полирующего порошка не сопровождается появлением царапин с рваными краями и растрескиванием стекла в ширину и в глубину. Благодаря пластическим свойствам коллоидной плёнки кремневой кислоты борозды, образующиеся от снятия "стружки", затягиваются. Оставшиеся от шлифования трещины заполняются коллоидными продуктами гидролиза стекла.

Для технологических и конструкторских расчётов принимают, что кинетическая энергия, расходуемая в относительном движении элементов кинематической пары стекло-инструмент, идёт на преодоление сопротивления стекла резанию его зёрнами полирующего порошка. Элементарные силы на каждом зерне и интегральное усиление резания полирования имеют статический характер.

Интегральная сумма элементарных сил образует усилие взаимодействия стекла с инструментом, которое является полезной нагрузкой станка при полировании. При полировании удаляется небольшой, но вполне ощутимый слой припуска, также как это было сделано в отношении шлифования.

При полировании химический процесс проявляется в том, что вода, действуя на стекло, образует коллоидную плёнку. Толщина плёнки растёт быстро в зависимости от химической стойкости стекла данной марки, достигая предельной толщины приблизительно за одну минуту. Раньше считали, что процесс полирования может идти при взаимодействии зёрен только с коллоидной плёнкой, но теперь режимы обработки стали так интенсивны, что плёнка не успевает образовываться и зёрна полирующего порошка воздействуют на стекло, не имеющее поверхностной плёнки. Доказано, что и в этом случае образуется поверхность полированная 13-го и 14-го классов шероховатости.

Таким образом, механическое воздействие зёрен имеет преобладающее значение и его усиление увеличивает эффективность полирования стекла. При полировании с помощью механических воздействий можно управлять процессом образования поверхности с заданными значениями  $N$ ,  $\Delta N$  и  $P$ .

На полированной поверхности, кроме неровностей, значения которых оговорены 13-м и 14-м классами по ГОСТ 2789 – 73, всегда могут быть дефекты. Дефекты шероховатости остаются от шлифованной структуры или появляются в виде царапин на поверхности обработанной детали.

Царапины в процессе полирования образуются при попадании под инструмент частиц более твёрдых и крупных, чем зёрна полирующего порошка. Размеры дефектов чистоты полированных поверхностей оптических деталей нормируются и указываются соответствующими значениями в ГОСТе 11141 – 76.

Полирование выполняют на тех же станках, что и шлифование, но при меньшей частоте вращения рабочих органов. Шлифование длится минуты, а полирование – часы, т. е. Время приблизительно в 20 раз большее времени шлифования.

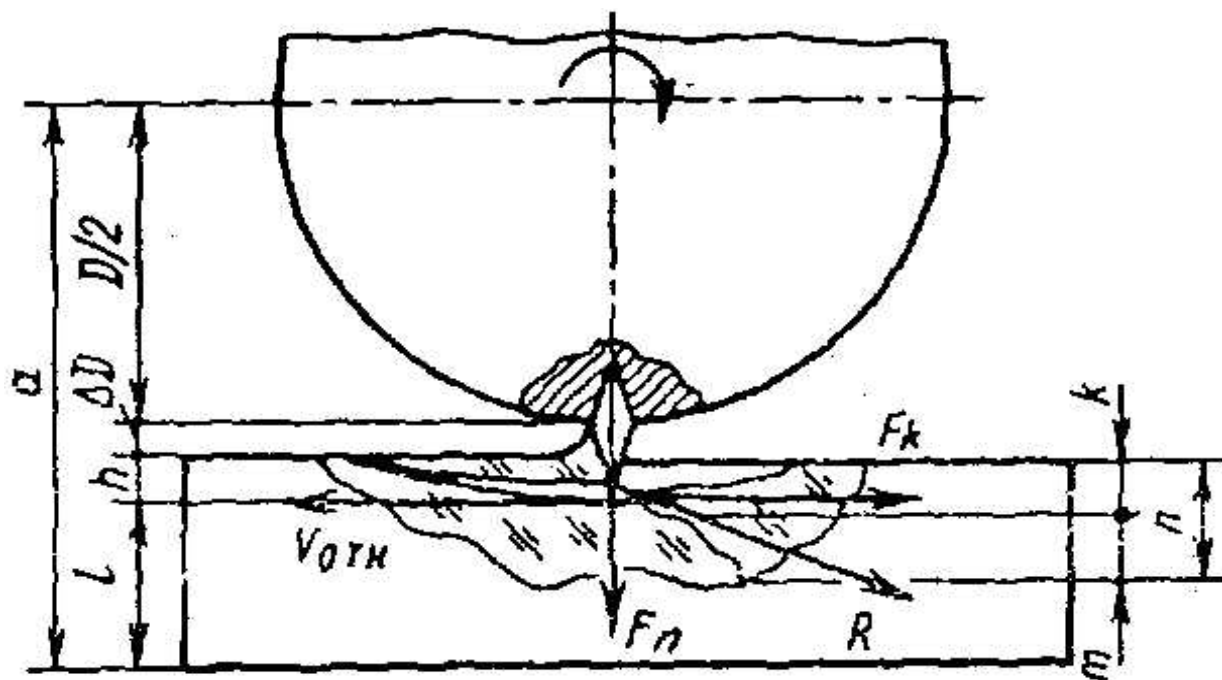


Рис.13.1 Схема работы закреплённого абразивного зерна

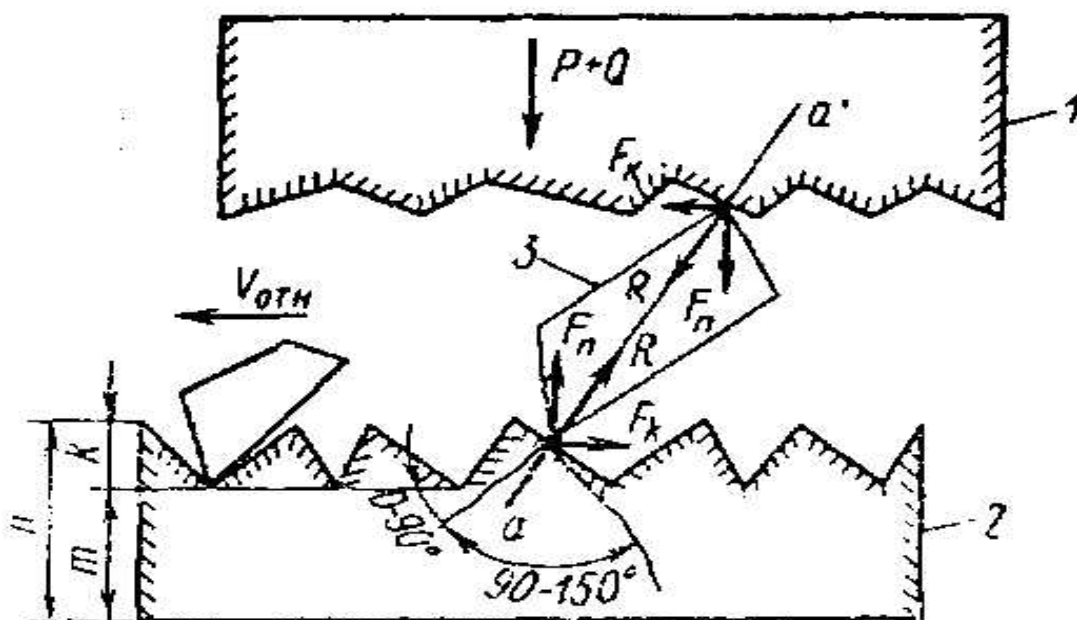


Рис.13.2 Схема работы свободного абразивного зерна

## **Лекция 14. Схемы механической обработки оптических деталей шлифованием**

### **1. Технологическая система обработки**

Оптические детали изготавливают механической обработкой заготовок со снятием припусков. Припуск снимается последовательным выполнением ряда технологических операций: точение резцом, шлифованием инструментом с закрепленными абразивными зернами (ЗАЗ), притиркой водными суспензиями, обработкой абразивным порошком и шлифованием.

Цель каждой операции - уточнение размеров и формы и уменьшение микронеровностей обработанной поверхности заготовки. Для этого выбирают определенную технологическую систему обработки: станок-приспособление-инструмент-деталь. Наиболее распространена в оптических технологиях система СПИД - станок-приспособление-инструмент-деталь (рис.14.1). Система СПИД характеризуется геометрическим построением и кинематической схемой обработки, видом инструмента и способом его замыкания с заготовкой, а так же способами обработки поверхностей с требуемой точностью.

Основные признаки системы СПИД являются:

- 1) способ замыкания цепи движения рабочих органов элементами кинематической пары инструмент-заготовка, геометрическое или силовое, от которого зависит достижимая точность формы и кривизны обрабатываемой поверхности;
- 2) вид соприкосновения обрабатывающего инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки (в точке, по линии, по поверхности), от которого зависит класс чистоты обработки и геометрическое совершенство формы поверхности.

В системе СПИД на Рис.14.1а осуществлено геометрическое замыкание заготовки с инструментом – в точке, резец перемещается прямолинейно, а заготовка вращается, основная измерительная база совмещена с установочной. Неточности изготовления и настройки инструмента и заготовки передаются на заданную форму и размеры детали. Такая система используется для снятия большого объема припуска при предварительной обработке вспомогательных поверхностей больших размеров.

В системе СПИД на Рис.14.1б осуществлено геометрическое замыкание заготовки с инструментами по линии. Круг с ЗАЗ перемещается и вращается, а заготовка только вращается. Основная измерительная база совмещена с установочной. Применяется эта схема для обработки вспомогательных цилиндрических поверхностей линз, сеток и фасок, точность обработки до 0,01 мм.

В системе СПИД на Рис.14.1в осуществлено соприкосновение заготовки с инструментом по линии, а замыкание этой кинематической пары силовое, т.е. силой  $P$ . Съем припуска происходит в процессе взаимной притирки рабочей кромки инструмента и поверхности заготовки с помощью абразивной суспензии. В процессе обработки заготовка вращается, а инструмент совершает сложное возвратно-поступательное движение

параллельно оси 1-1. Такая схема рекомендуется для обработки асферических поверхностей типа параболоида, эллипсоида, гиперболоида.

В схеме СПИД на Рис.14.1г заготовка соприкасается с инструментом по поверхности при геометрическом замыкании размерной и кинематической цепи. При обработке инструмент закреплен жестко и не меняет геометрического профиля за время операции. Применяют для обработки плоских поверхностей, призм, сеток, шкал, оптических клиньев.

В схеме СПИД на Рис.14.1д инструмент и заготовка вращаются на осях расположенных под некоторым углом, что позволяет обрабатывать сферические поверхности. Обрабатывается методом врезания, при котором инструмент всей площадью подается на обрабатываемую поверхность заготовки. Отклонение происходит от неточностей установок. Эту систему применяют главным образом для предварительного шлифования исполнительных оптических поверхностей деталей, окончательного шлифования вспомогательных плоских и сферических поверхностей.

В схеме СПИД на Рис.14.1е инструмент соприкасается с заготовкой по поверхности силовым замыканием, и они взаимно притираются суспензией абразивных порошков. Инструмент работает по методу врезания. Такая система применяется для обработки исполнительных поверхностей, предварительных и финишных операций шлифования и полирования оптических поверхностей, оцениваемых параметрами  $N$ ,  $\Delta N$ ,  $P$ .

## **2. Способ свободной притирки**

При шлифовании заготовка притирается к обрабатывающей поверхности твердого инструмента - шлифовальника, а при полировании мягкие смоляные и войлочные подложки инструментов притираются к шлифованной поверхности заготовки стекла.

Схема способа свободной притирки показана на Рис.14.2. Установочной базой для рабочей поверхности инструмента 2 является исходная поверхность заготовки 1. При снятии припуска установочная база изменяет свое положение относительно деталей станка и радиус  $R_{\text{зах}}$  изменяется на радиус  $R$  обрабатываемой поверхности. Для обрабатываемой поверхности 1 измерительной базой является центр сферы  $O$ , от которого определяется единственный размер сферы – радиус  $R$ . Такая обработка называется способом свободной притирки. Способ свободной притирки определяется наличием следующих признаков:

1) соприкосновение рабочей поверхности инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки происходит по площадкам конечных размеров;

2) прилегание притирающихся поверхностей инструмента и заготовки как двух элементов кинематической пары третьего класса осуществляется силовым замыканием;

3) одна из притирающихся поверхностей самоустанавливается на другой с помощью шарового шарнира 3 поводка верхнего звена;

4) относительное движение инструмента 2 по обрабатываемой поверхности заготовки 1 состоит из трех простых вращательных движений со скоростями  $W_B$  и  $W_H$  верхнего и нижнего звеньев и скорости  $W_{\text{КОР}}$  - качания коромысла вокруг центра сферы  $O$ ;

5) ось одного из вращательных движений является нормалью к притирающимся сферическим или плоским поверхностям;

6) относительное перемещение и геометрия площадок инструмента выбраны так, что все точки на притирающихся поверхностях находятся в многократном аperiодическом покрытии всеми площадками парного звена.

Способ свободной притирки всегда используют при обработке сферических и плоских поверхностей. Способ притирки это когда один элемент кинематической пары свободно устанавливается (самоустанавливается) на своем парном звене. Технологическими признаками обработки способом свободной притирки является:

1) наличие суспензии абразивных порошков;

2) изменение геометрии профиля рабочей поверхности инструмента из-за его износа за время обработки даже одной заготовки;

3) наличие притиров из материалов, имеющих по отношению к зернам суспензии при шлифовании фрикционные, а при полировании адсорбционные свойства.

Наиболее существенный недостаток способа свободной притирки заключается в том, что на станке нельзя заранее установить заданный радиус обработанной поверхности, он достигается лишь путем правки инструмента и перенастройки станка в процессе выполнения операций шлифования и полирования.

### **3. Кинематические схемы обработки**

Кинематические схемы обработки поверхностей оптических деталей отображают абсолютные простые вращательные и поступательные движения, которые в том или другом сочетании сообщаются инструментам и заготовке в различной технологической системе станок-приспособление-инструмент-деталь. Кинематическая схема обработки является кинематической основой системы станок-приспособление-инструмент-деталь, которой они принципиально отличаются одна от другой. Наиболее распространенная кинематическая схема обработки сфер на станке типа ШП шлифованием и полированием сфер оптических поверхностей показана на Рис.14.3.

Из кинематической схемы станка выделены и рассматриваются простые движения вокруг осей 1-1 и 2-2. Поводок 4 качается вокруг оси 3 вместе с коромыслом 5 и вокруг последнего вместе с кареткой 6. Это сложное движение благодаря замыканию силой  $P$  шарового шарнира 7 приводится к простому плоскому движению вокруг центра обрабатываемой сферической поверхности. Принято условно, что обрабатываемая заготовка является всегда нижним звеном.

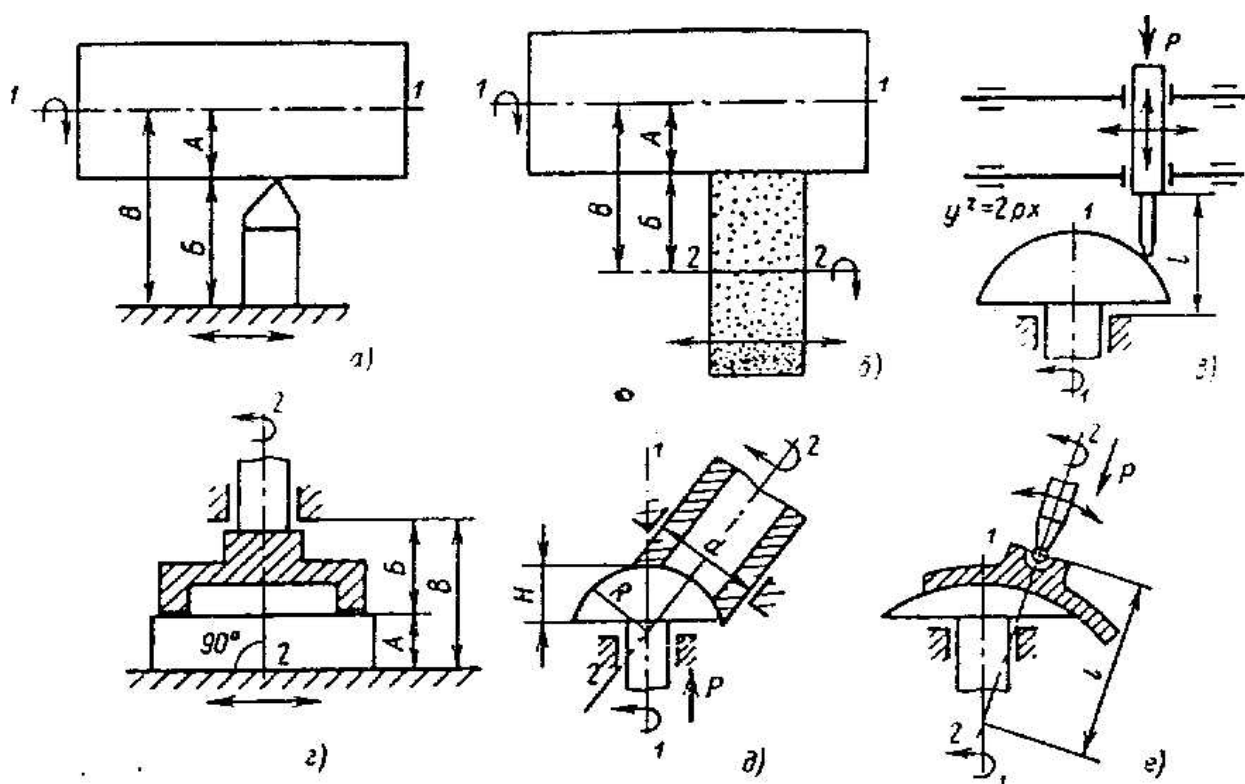


Рис.14.1 Системы СПИД обработки оптических деталей : **а**-геометрическое замыкание, контакт в точке; **б**- геометрическое замыкание, соприкосновением по линии; **в**-силовое замыкание, соприкосновение по линии; **г**-замыкание силовое, соприкосновение по поверхности; **д,е**-замыкание силовое, соприкосновение по поверхности, соответственно два и три вращательных движения

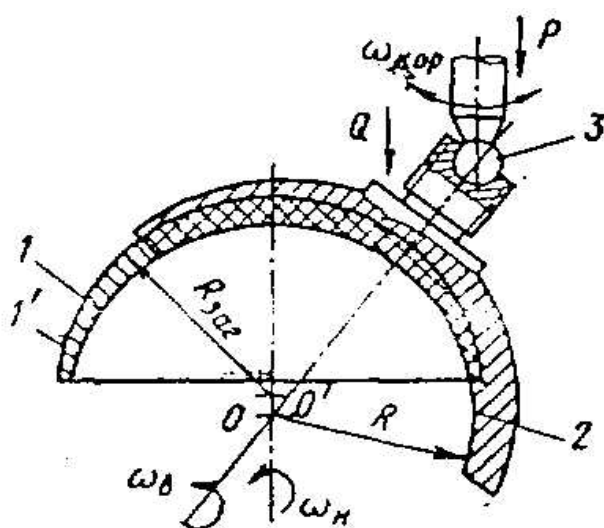


Рис.14.2 Схема обработки свободным притиром.

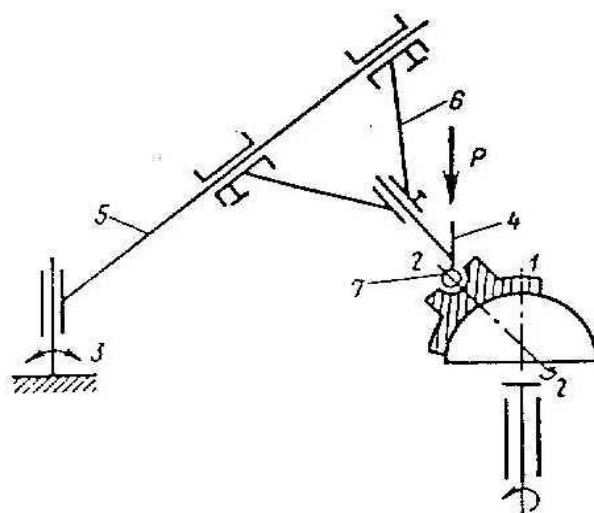


Рис.14.3 Кинематическая схема обработки притиркой.



## Лекция 15. Параметры и показатели свободной притирки

### 1. Схемы расположения припусков

Исходная поверхность заготовки отстоит от сферической, заданного радиуса, поверхности детали на слой припуска, который по круговым зонам в общем случае имеет различные толщины. При обработке сфер способом свободной притирки слой припуска ограничен двумя всегда сферическими поверхностями – исходной заготовки и обрабатываемой детали. Имеется три схемы расположения межоперационного припуска:

- 1) слой равной толщины;
- 2) минимум припуска на краю;
- 3) минимум при вершине заготовки.

Все три эти схемы можно представить графически на Рис.15.1. Межоперационный припуск всегда больше, чем технологически минимально необходимый слой  $z_k$ , определяемый классом шероховатости  $R_z$  предыдущей обработки. Объем припуска  $q$  снимаемый с поверхности заготовки также больше минимально необходимого. Указанные схемы служат основанием для выбора программы обработки. Объем припуска  $q$ , снимаемый с поверхности заготовки определяют по соответствующим аналогичным зависимостям для каждой схемы расположения припуска отдельно.

Так, для первой схемы, когда  $z_\lambda = z_{\min}$  при  $\lambda = Q$ , т.е. минимальный слой припуска с края, объем припуска  $q$  определяется

$$q = \frac{\pi R_2^2}{\cos Q} [z_{\min} \sin^2 Q - (R_1 - R_2)(1 - \cos^2 Q)] \quad (15.1)$$

где  $R_2 = R$  - радиус готовой детали, а  $R_1 = R_{3AG}$

Для схемы минимума толщина слоя припуска в центре, т.е.  $z_\lambda = z_{\min}$  при  $\lambda = 0$

$$q = \pi R_2^2 [z_{\min} \sin^2 Q - (R_1 - R_2)(1 - \cos^2 Q)] \quad (15.2)$$

Для схемы припуск равной толщины, т.е.  $z_\lambda = z_{\min} = \text{const}$

$$q = 2\pi R_2^2 z_{\min} \quad (15.3)$$

Рассмотренные схемы на Рис.15.1 и соответствующие аналогичные зависимости описывают все возможные и действительные схемы расположения припуска. Современное технологическое оборудование позволяет достаточно быстро удалять такой припуск, но немаловажную роль играет не только толщина припуска, но и его расположение по кольцевым зонам обработки. В зависимости от этой схемы выбирают геометрические параметры инструмента и режимы настройки станка. Для обеспечения оптимизации программы необходимо также учитывать коэффициент заполнения зоны обработки стеклом при обработке блоков заготовок.

### 3. Коэффициент заполнения

Для повышения производительности технологического процесса в производстве применяют блочную обработку, т.е. собирают обрабатываемые детали в блоки, где все детали обрабатывают одновременно. Схемы расположения заготовок выбирают заранее. По

ним выбирают размеры и геометрию инструментов. У блоков заготовок и обрабатывающего инструмента различают геометрию площадей притирающихся поверхностей и геометрию профиля. В технологической подготовке производства принято на блоках заготовки и инструмент рассматривать по кольцевым зонам симметричным оси вращения блока. Геометрия рабочего инструмента и блоков определяется коэффициентом заполнения кольцевых зон расположенных по радиусу от оси вращения блока. Геометрию площадок заготовки и рабочего элемента инструмента рассмотрим по кольцевым зонам радиуса  $r$  или угла  $\lambda$ , а также имеющих линейную и угловую ширину  $\Delta r$  и  $\Delta \lambda$  зон, соответственно. Коэффициент заполнения  $\eta_{r,\lambda} = f(r, \lambda)$  численно характеризует сопротивление данной зоны обработке по сравнению со сплошной зоной, того же радиуса  $r$  или углового положения  $\lambda$ , а также ширины  $\Delta r$  и  $\Delta \lambda$ , соответственно.

Коэффициент заполнения  $\eta_r$ , кольцевой зоны среднего радиуса  $r$  определим следующей аналитической зависимостью

$$\eta_r = \frac{\sum_i^n \delta_r}{2\pi r \Delta r}, \quad (15.4)$$

где  $n$  и  $\delta_r$  - число и площадь соответственно участков рабочих площадок входящих в кольцевую зону для плоской поверхности показанной ниже на Рис.15.2а;  $r$  и  $\Delta r$  - средний радиус и ширина кольцевой зоны, соответственно.

При обработке сферических поверхностей аналогично рассмотрим коэффициент заполнения  $\eta_\lambda$ , блока, схема расположения деталей которого находится на Рис.15.2б.

$$\eta_\lambda = \frac{\sum_i^n \delta_\lambda}{2\pi R \Delta \lambda \sin \lambda} \quad (15.5)$$

где  $n$  и  $\delta_\lambda$  - число и площадь соответственно участков рабочих площадок входящих в кольцевую зону для сферической поверхности показанной ниже на Рис.15.2б;  $\lambda$  и  $\Delta \lambda$  - средний угловой радиус и угловая ширина кольцевой зоны, соответственно.

Коэффициент заполнения - величина безразмерная, как правило, меньше 1. Для зон сплошных поверхностей заготовок  $\eta$  равно 1, а для всех других зон  $\eta$  меньше 1. Если в зоне вообще нет участков, заполненных стеклом, металлом или смолой, то  $\eta = 0$

В общем случае площадки имеют произвольную конфигурацию и расположение, т.е. геометрию. Тогда для вычисления  $\eta$  следует: 1) всю поверхность разбить на ряд концентричных зон постоянной ширины; 2) графически или с помощью планиметра

определить суммарную площадь  $\sum_1^n \delta$  заполнения зон; 3) вычислить коэффициенты заполнения  $\eta$ . Наиболее удобно принять  $r=0;0,1;0,2...;1$  и разбить всю поверхность на 10 кольцевых зон, что позволит табулировать последующие вычисления значений  $\eta(r)$ . Этот способ подсчёта  $\eta(r)$  даёт погрешность результата 2 – 4%.

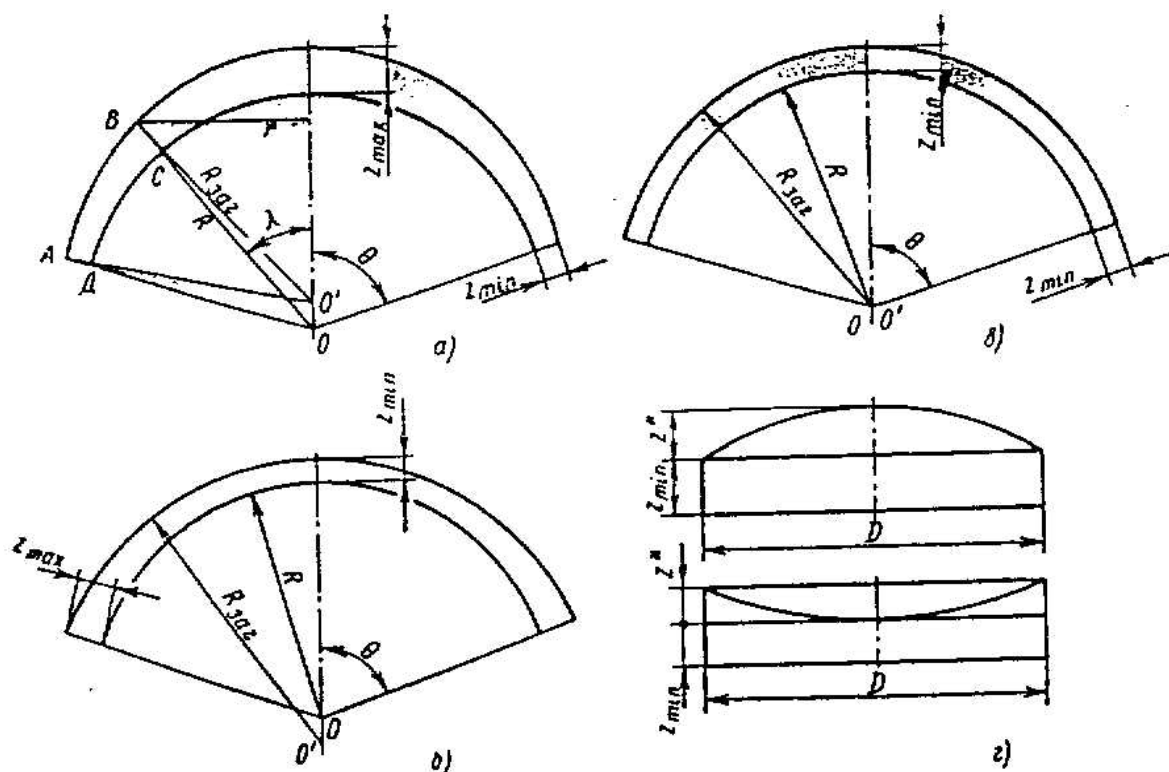


Рис.15.1 Схемы расположения припуска : *а*-  $Z_{min}$  по краю; *б*- $Z_{min}$  в центре; *в*- слой равной толщины; *г*-припуск на плоскости  $Z_{max}$  в центре

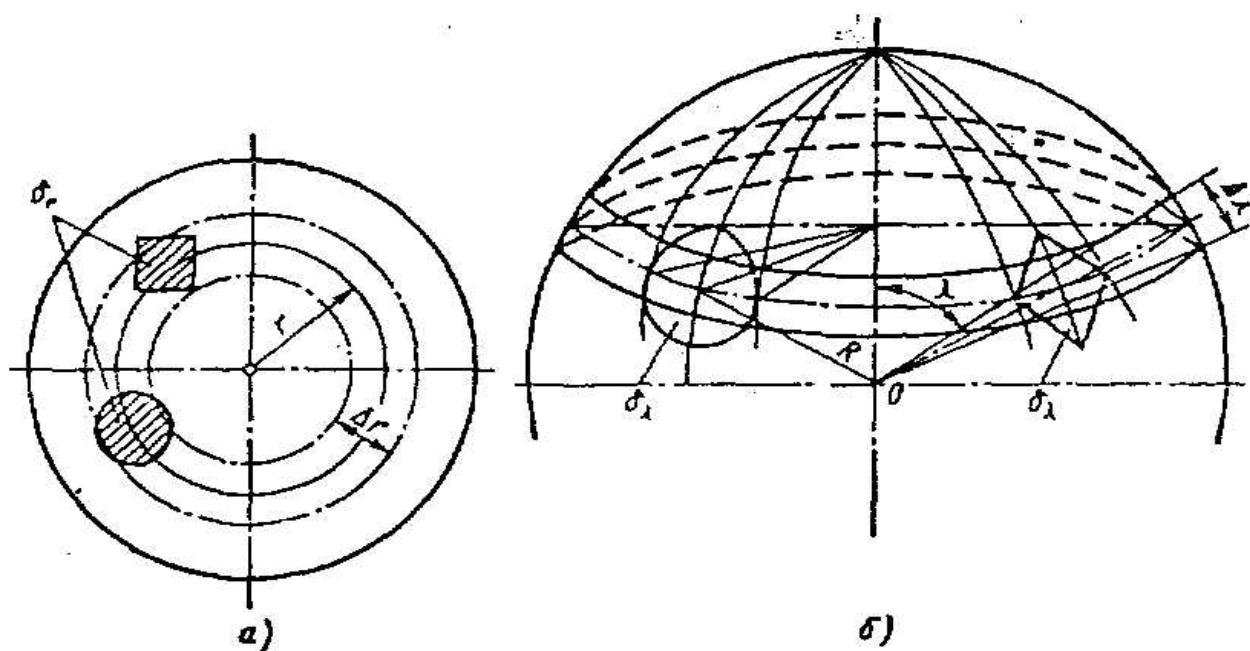


Рис.15.2 Коэффициент заполнения притирающихся поверхностей материалом : *а*- плоских; *б*-сферических

## Лекция 16. Анализ работы притира

### 1. Интенсивность обработки

Удаление припуска абразивным разрушением, полированием стекла, а также износ инструмента в процессе свободной притирки стекла происходит при затрате механической работы, значительная часть которой переходит в тепло. Объем припуска  $q$  стекла, удаленного притиркой прямопропорционален количеству затраченной на нее работы, следовательно:

$$q=k \cdot A, \quad (16.1)$$

где  $A$  - работа затраченная на удаление припуска;  $k$  - технологический коэффициент, выражаемый удельным объемом припуска снятого с заготовки при затрате единицы работы с учетом действия технологических параметров. Механическая работа  $A$  определяется как:

$$A=F \cdot V \cdot n \cdot T, \quad (16.2)$$

где  $F$  - среднее значение за цикл  $T$  взаимодействия верхнего звена (инструмента) с нижним (блоком обработки заготовок), то есть среднее рабочее усилие;  $V$  - среднее за цикл  $T$  значение вектора относительной скорости движения верхнего звена по нижнему, то есть средняя рабочая скорость;  $n$  - число циклов обработки. Усилие  $F$  и скорость  $V$  названы рабочими, так как их значениям прямопропорциональна работа, затраченная на удаление объема припуска. Сила  $F$  – это среднее значение вектора силы, приложенной к шаровому шарниру поводка верхнего звена, направленного тангенциально к обрабатываемой поверхности и прямо противоположного вектору относительной скорости.

Экспериментально установлено, что при шлифовании:

$$F=(P+Q)/4, \quad (16.3)$$

где  $k_{ш}=3,8$ . Также экспериментально установлено, что при полировании:

$$F=2(P+Q)/3, \quad (16.4)$$

где  $k_{п}=3,8 \cdot 10^{-5}$ ,  $P$  - сила нажатия поводка станка;  $Q$  - сила тяжести верхнего звена.

Если верхнее звено вращается свободно (в большинстве случаев обработки), то приближенно принимают, что рабочая скорость  $V$  во всех зонах  $r$  равна средней относительной скорости движения центра верхнего звена, то есть:

$$V=(L \cdot \pi \cdot n)/60, \quad (16.5)$$

где  $L$  - размах качания верхнего звена. Так, в первом приближении по значениям параметров режима обработки определяют работу  $A$ , предназначенную для удаления слоя припуска объемом  $q$ . Интенсивность обработки измеряют объемом припуска  $q$ , удаленного в единицу

времени. Интенсивность режимов обработки выбирают в зависимости от геометрических параметров и заданной точности обработки.

## **2. Технологические параметры и факторы**

*Технологическими параметрами* процесса механической обработки называют, например, качество материалов инструментов и стекол, зернистость абразивного порошка, расход и кислотность суспензии, температура в помещении цеха и др. Эти параметры оказывают влияние на интенсивность обработки, которое учитывается значениями технологического коэффициента. Кроме технологических параметров, значения которых постоянны во времени и известны заранее, есть еще и технологические факторы, влияющие на процесс обработки.

*Технологическими факторами* называют результат одновременного действия многих независимых параметров режима обработки, свойств основных и вспомогательных материалов или данных окружающей среды. Их обычно нельзя рассчитать заранее и выразить в явной функциональной зависимости от одного из них. Качественно результат их действия выявляются только после начала выполнения операции, перехода. Полным примером технологического фактора является распределение абразивной суспензии. Он выражает результат сочетания одновременного действия нескольких независимых параметров: геометрии и угловых скоростей верхнего и нижнего звеньев; расхода, концентрации, свойств, места и способа подачи абразивной суспензии.

Влияние технологических факторов нарушает постоянство и закономерность действия независимых параметров процесса и повторяемость результатов обработки. Их действие вызывает необходимость регулирования обработки по способу пробных проходов, повышения вспомогательного времени, что понижает производительность. Сила нажатия поводка  $P$  и сила тяжести верхнего звена  $Q$  (рис. 16.1) распределяются по зонам сопряженных поверхностей. Эти силы действуют на слои металла инструмента и стекла заготовки сложной геометрической формы, слои наклеочной и полировочной смол, абразивной суспензии, и рабочее давление становится технологическим фактором.

Давление по зонам притирающихся поверхностей распределяется при перемещении верхнего звена 2 по нижнему звену 1 и разрушении их материалов. Упругие, пластические, тепловые и другие деформации этих слоев взаимосвязаны, но не имеют какой – либо определенной временной зависимости. Анализ распределения работы во времени производят при разработке приемов управления процессом обработки.

## **3. Приемы управления процессов обработки**

Перераспределение интенсивности обработки по зонам обрабатываемой поверхности осуществляется с помощью механизмов и элементов управления, предусмотренных в конструкциях станков и инструментов. Средствами управления процессом образования поверхности детали и выполнения программы обработки изменяют параметры геометрии поверхности инструмента, размах движения верхнего звена, частоты вращения. В единичном производстве главным, наиболее эффективным приемом управления служит изменение геометрии сплошной обрабатываемой поверхности инструмента с помощью резов. Резы изменяют распределение рабочих площадок по кольцевым зонам инструмента, что со временем вызывает изменение кривизны профиля сопряженных поверхностей.

В серийном производстве главным средством управления процессом образования оптической поверхности заданной кривизны также служит правка инструмента. Перенастройку и поднастройку применяют реже из-за несовершенства конструкции станков ШП и сложности для рабочего расчетов эффекта действия изменения кинематических

параметров. Чтобы избежать остановок станка для правки инструмента, предпочтительнее применять инструменты с секториально-кольцевой и каблучной геометрией, рассчитанной на закономерное изменение кривизны.

#### 4. Функция распределения интенсивности обработки

Работа станка затрачивается на то, чтобы за наименьшее количество циклов  $T$  с заготовки поперечно снять слой припуска толщиной  $z$  и образовать поверхность измененного состояния и требуемого радиуса кривизны и чистоты. Чтобы быстрее получить требуемую поверхность, надо привести закон распределения работы притира затрачиваемой в круговых зонах заготовки  $r$ , в соответствии со схемой расположения припусков. Работу притира  $A_r$  в зонах  $r$  принимают как сумму отдельных компонентов следующего уравнения.

$$A_r = n F_r V_r^{\text{отн}} t_r, \quad (16.6)$$

где  $n$  - число циклов взаимодействия инструмента со стеклом;  $F_r$  - средняя сила взаимодействия зон стекла с инструментом за цикл  $T$ ;  $V_r^{\text{отн}}$  - средняя рабочая скорость в зонах  $r$  за цикл  $T$ ;  $t_r$  - среднее рабочее время, т.е. среднее значение времени обработки зон  $r$  взятое за цикл  $T$ .

Уравнения профиля слоя  $z$  припуска и работы  $A_r$ , затрачиваемое на его удаление, являются исходной и кинематической программами обработки. В результате выполнения кинематической программы на заготовке образуется заданная поверхность обрабатываемой детали. Сила  $F_r$  в зоне  $r$  изменяется в процессе обработки самопроизвольно, неуправляемо преобразуясь, но так, что ее средним значением остается  $F_r$ . Самопроизвольное выравнивание рабочего давления  $P_r$  и, следовательно, силы  $F_r$  позволяет управлять процессом изменения кривизны обрабатываемой поверхности, программируя значения только кинематических компонентов  $V_r$  и  $t_r$ , т.е. можно принять уравнение

$$z(r) = A_r / K = \text{const} V_r \cdot t_r. \quad (16.7)$$

**Задавая некоторый режим обработки значениями  $A_r$  и  $K$  по схеме расположения припуска  $z(r)$  можно составить программу распределения работы станка по зонам обрабатываемой поверхности  $V_r \cdot t_r$ . Работу  $A_r$  по зонам  $r$  распределяет обрабатывающий инструмент в зависимости от настройки станка. Программа снятия припуска  $z(r)$ , выраженная произведением кинематических показателей  $V(r) \cdot S(r)$ , выполняется с помощью инструмента некоторой геометрии и настройки станка по определенным параметрам при выбранном режиме обработки. Геометрия инструмента и настройка станка, являясь независимыми параметрами процесса управления обработкой, проектируются так, чтобы произведение кинематических компонентов было плавной функцией, график которой согласуется с видом функции припуска  $z(r)$ .**

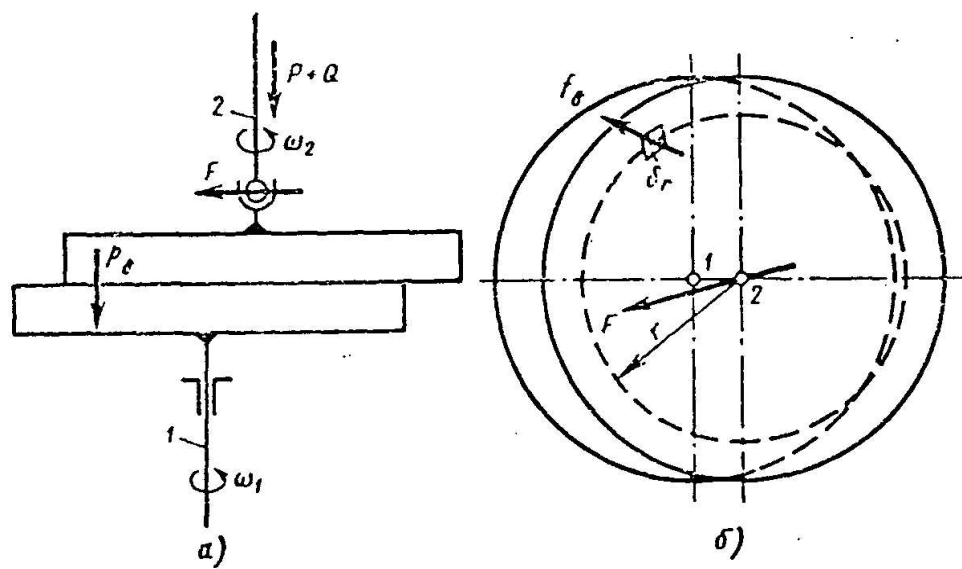


Рис.16.1 Усилия при обработке притиркой: а-вид сбоку; б-вид в плане.

## Лекция 17. Абразивный технологический инструмент

### 1. Шлифующие абразивы

Шлифующие абразивы – твёрдые, мелкозернистые, кристаллические вещества в порошкообразном состоянии. По происхождению бывают природными и искусственными. В оптическом производстве абразивы применяют в свободном состоянии – в виде жидких суспензий, или в связанном – алмазный инструмент. Основными шлифующими абразивами являются алмаз, корунд, электрокорунд, карбид кремния, карбид бора.

*Алмаз* (природный и синтетический) – кристаллическая модификация углерода. Твёрдость по минералогической шкале 10, микротвёрдость 100 000 мПа. Алмаз встречается в природе в виде отдельных кристаллов вросших в горную породу. Синтетические алмазы в виде порошков получают различными методами: кристаллизацией углерода из его растворов в расплавленных металлах; эпитаксиальным наращиванием на алмазных затравках в присутствии углеродосодержащих газов или жидкой среды; прямой перестройкой кристаллической решётки графита в алмазную. В зависимости от условий синтеза получают порошки зерна, которых отличаются размерами, формой, характеристикой поверхности, прочностью и хрупкостью. Для обработки оптических материалов их в основном используют в связанном состоянии. В свободном виде они находят применение на завершающих стадиях обработки некоторых оптических кристаллов.

*Корунд* – кристаллическая окись алюминия  $Al_2O_3$ . Встречается как составная часть горных пород в виде кристаллов. Содержание корунда в горных породах колеблется от десятых долей до 100%. Примеси Fe, Cr определяет окраску корунда. Наждаком называют корунд в сочетании с гематитом, пиритом, магнетитом и слюдами. Твёрдость корунда по минералогической шкале 9 единиц, микротвёрдость 16 000 - 24 000 мПа. В свободном состоянии используется для шлифования практически всех оптических материалов.

*Карбокорунд* – химическое соединение углерода с кремнием, полученное при плавлении смеси угля с кварцевым песком. Чистый карбокорунд бесцветен, технический – окрашен в различные цвета от светло-зелёного до чёрного. Твёрдость 9,5, микротвёрдость 28 000 – 33 000 мПа. Для обработки оптических материалов имеет ограниченное применение, т.к. оставляет на поверхности глубокие царапины.

*Электрокорунд* – кристаллическая окись алюминия, получаемая электроплавкой горных пород. Промышленность выпускает несколько видов электрокорунда, которые в зависимости от количества находящихся в них кристаллической фракции окиси алюминия и примесей имеют разную структуру, свойства и цвет, т.е.: электрокорунд нормальный; электрокорунд белый; электрокорунды легированные; монокорунд. Применяется в виде водных суспензий для шлифования всех оптических материалов, кроме особо твёрдых.

*Карбид бора* – соединение углерода с бором. Получают плавлением смеси борного ангидрида и кокса. По твёрдости близкий к алмазу, микротвёрдость 33 000 – 43 000 мПа. Применяют при сверлении отверстий в стекле и других оптических материалов и шлифовании твёрдых оптических кристаллов.

### 2. Зерновой состав и зернистость абразивов

Все абразивы, в зависимости от размеров, разделены на группы, а при группе по этому же признаку на номера зернистости. Осуществить классификацию так, чтобы порошок каждого номера зернистости состоял лишь из зёрен одного размера практически невозможно. Содержание его составляет несколько фракций (групп зёрен, размеры которых ограничены узким пределом): основная – принята за характеризующую данный номер



зернистости; побочная – крупнее и мельче основных. Количественное содержание фракций характеризует зерновой состав абразива.

Шлифующие порошки природного и синтетического алмаза разделяют на две группы: шлифпорошки, микропорошки.

Шлифпорошки природного алмаза имеют одну марку – А, синтетического – пять: АСО, АСР, АСВ, АСК, АСС (АС – алмаз синтетический; О, Р, В, К, С – индексы типов порошков, отличающихся физико-механическими свойствами).

Зёрна порошка АСО имеют повышенную хрупкость, а зёрна АСР более прочны и менее хрупки по сравнению с АСО. У зёрен АСВ прочность выше, чем АСО и АСР и менее хрупки; АСК имеют большую прочность и менее хрупки, чем АСВ.

Шлифпорошок путём просева исходных элементов через сито с последовательно уменьшающимся размером ячейки разделён на номера зернистости. В порошок каждой зернистости входит 3 фракции: крупная, основная и мелкая. Размер зёрен каждой фракции определяется размером ячейки (мкм), соответствующей просеивающему сити. Зернистость устанавливается неправильной дробью, у которой числитель – это размер ячейки верхнего сита, знаменатель – размер ячейки нижнего сита. Зёрна, оставшиеся на каждом сите взвешиваются, и определяется их содержание, выражаемое в процентах. Качество порошка характеризуют прочностью зерен. Ниже в таблице 17.1 приведены зернистость и зерновой состав алмазных шлифпорошков

Таблица 17.1

Диапазон зернистости	Зернистость	Фракция			
		Крупная		Основная	Мелкая
		Должно проходить через сито 100%	Может задерживаться в сите не более 15%	Должно задерживаться на сите не менее 15%	Может проходить через сито не более 3%
Широкий	400/250	500	400	250	200
	250/160	315	250	160	125
	160/100	200	160	100	80
	100/63	125	100	63	50
	63/40	80	63	40	—
Узкий	630/500	800	630	500	400
	500/400	630	500	400	315
	400/315	500	400	315	250
	315/250	400	315	250	200
	250/200	315	250	200	160
	200/160	250	200	160	125
	160/125	200	160	125	100
	125/100	160	125	100	80
	100/80	125	100	80	63
	80/63	100	80	63	50
	63/50	80	63	50	40
	50/40	63	50	40	—

### 3. Микропорошки

Микропорошки природных алмазов имеют марки АМ и АН, а синтетических – АСМ и АСН. Характеристикой качества порошков АСМ и АСН, наряду с зерновым составом, является гарантированная норма шлифующей способности, которая задаётся режимом

синтеза и режимом технологической обработки порошка. У порошков марки АСН она на 30 – 40% выше по сравнению с АСМ.

Шлифующая способность порошков АМ и АН зависит от природных месторождений алмаза. У порошков АМ она ниже, чем у АН. Микропорошки на номера зернистости подразделяются центрифугой или осаждением в столбе жидкости. Зерновой состав микропорошков определяют, измеряя размер 500 штук зёрен с помощью микроскопа. Микропорошки имеют размер зёрен от 80 до 1 мкм. Порошки зерна, которых мельче 1 мкм служат исходным сырьём для изготовления субмикропорошков используемых при обработке полупроводниковых кристаллов кварца и рубинов. Качество абразивных порошков оценивают по их шлифующей способности и шероховатости обработанной поверхности. Далее в таблице 17.2 указаны зернистость и зерновой состав алмазных микропорошков АСМ, АСН, АН и АМ

Таблица 17.2

Зернистость	Фракция, мкм		
	Крупная, не более 5%	Основная, не менее 65%	Мелкая, не более 30%
60/40	80-60	60-40	40-20
40/28	60-40	40-28	28-14
28/20	40-28	28-20	20-10
20/14	28-20	20-14	14-7
14/10	20-14	14-10	10-5
10/7	14-10	10-7	7-3
7/5	10-7	7-5	5-2
5/3	7-5	5-3	3-1
3/2	5-3	3-2	до 2
2/1	3-2	2-1	до 1
1/0	2-1	(не менее 95%)	—

Шлифующую способность характеризуют массой материала сошлифованного с образца стекла в стандартных условиях испытания. Её относительное значение для некоторых абразивов следующая:

Таблица 17.3

Шлифующий абразив	Относительная шлифующая способность
Алмаз	1,0
Кубический нитрид бора	0,58-0,60
Карбид бора	0,50-0,60
Карбид кремния	0,25-0,45
Монокорунд	0,15-0,25
Электрокорунд	0,14-0,16
Наждак	0,03-0,08
Кварцевый песок	0,02-0,03

#### 4. Полирующие абразивы

К полирующим абразивам относятся мелкокристаллические, находящиеся в порошкообразном состоянии окислы некоторых металлов.

*Крокус*  $Fe_2O_3$  - безводную окись железа, получают осаждением солей железа (сульфатного, углекислого, щавелевого кислого) из раствора и последующим прокаливанием при температуре равной 700 - 800°C, зёрна имеют округлую форму, размеры от 0,6 до 1 мкм. Применение крокуса ограничено по сравнению с другими порошками низкой полирующей способностью. Используют для полирования деталей из стекла, чистота поверхности, которого должна соответствовать первому классу по ГОСТ11141-76.

*Полирит* – состоит в основном из окислов редкоземельных металлов, исходное сырьё – минералы лопарит и монацит. Зёрна имеют форму удлинённых пластинок размером до 5 мкм. Они легко дробятся, образуя остроугольные осколки. Твёрдость от 6 до 7 единиц. Это основной полирующий абразив, используемый при изготовлении деталей из стекла.

*Окись тория*  $ThO_2$  - получают прокаливанием тория или его органических солей. Зёрна имеют форму четырёхугольных пластинок размером до 10 мкм. Они хрупкие, легко разрушаются. Твёрдость 6.5 единиц. Трудоёмкость изготовления тория определяет его высокую стоимость, что ограничивает применение порошка.

*Двуокись циркония*  $ZrO_2$  - получают разложением термически нестойких карбонатов и сульфатов. Исходным сырьём является баделит и циркон. Средний размер зёрен 3,5-5мкм. В оптических технологиях применяют для полирования стёкол марки СТК.

*Окись хрома*  $Cr_2O_3$  - изготавливают восстановлением бихромата калия серой, либо термическим разложением бихромата аммония. Первым способом получают порошок с размерами зёрен от 0,8 до 1,2 мкм. А вторым от 0,3 до 0,4мкм. Твёрдость по минералогической шкале 9 единиц. В оптических технологиях применяется для полирования деталей из кристаллических материалов с малой твёрдостью.

*Алмазные микропорошки АСМ и АСН зернистостей то 3/2 до 1/0 и субмикропорошки зернистостей от 0,7/0 до 0,3/0* – используют при полировании кристаллов рубина и кремния. При определенных условиях, характеризующихся в основном свойствами связки, микропорошки применяют и для полирования оптических кварцевых стекол.

Качество порошков оценивают по их полирующей способности и чистоте обработанной поверхности. Полирующую способность характеризуют количеством стекла сполитованного в заданный промежуток времени с образца определённого размера из стекла марки К8 в стандартных условиях.

Относительное значение полирующей способности для различных порошков близкого зернового состава приведено ниже в таблице 17.4:

Таблица 17.4

Полирующий абразив	Относительная полирующая способность
Окись хрома	0,5
Крокус	1,0
Полирид	1,5
Окись тория	2,2
Двуокись циркония	2,0

## **Лекция 18. Алмазный технологический инструмент**

### **1. Элементы конструкции инструмента**

Алмазный инструмент любого типа представляет собой металлический корпус, с которым прочно соединен алмазоносный слой - рабочая часть инструмента. Алмазные технологические инструменты характеризуют по:

- 1) форме и размерам;
- 2) размерам алмазного слоя;
- 3) марке, зернистости и концентрации алмазного порошка;
- 4) марке связки.

Эти параметры определяют эффективность работы инструмента, удельный расход алмаза и цену обработки, их оптимальный выбор имеет существенное значение в производстве.

Форму и размеры устанавливают в зависимости от формы, размера и материала обрабатываемой детали, конструкции и мощности станка. Предпочтение отдают инструменту с максимально допустимыми по условию обработки размерами алмазоносного слоя, это уменьшает затраты на инструмент, т.к. стоимость его изготовления понижается с повышением количества алмазного порошка в алмазоносном слое.

Марку алмазного порошка выбирают исходя из условий работы инструмента. Порошки с зернами малой прочности АСО эффективны в работе с малыми нагрузками (круглое шлифование линз), а порошки с зернами высокой прочности (АСВ, АСК, АСС) позволяют достичь высокую производительность при работе с большими нагрузками (распиливание, грубое шлифование, сверление отверстий).

Зернистость алмазного порошка назначают в зависимости от требований к шероховатости обрабатываемой поверхности и размера инструмента. С понижением зернистости, а вместе с тем и шероховатости, понижается производительность и повышается стоимость обработки. С другой стороны, с повышением зернистости повышается производительность, но одновременно повышается и шероховатость поверхности и глубина нарушенного слоя, и припуски на них.

Концентрация алмазного порошка характеризует его содержание (по массе) в одном сантиметре кубическом алмазоносного слоя. За концентрацию 100% принято 4,4 карата (1 карат = 0,2 грамма). Она влияет на срок службы инструмента, производительность и глубину нарушенного слоя. Назначают концентрацию в зависимости от размера рабочей поверхности инструмента, зернистости алмазного порошка, износоустойчивости связки. С понижением контакта инструмента с деталью повышается износ алмазоносного слоя. Для понижения износа концентрацию повышают (она находится в прямой зависимости от зернистости порошка). С повышением зернистости при постоянной концентрации порошка число зерен на единицу площади рабочей поверхности инструмента понижается, производительность процесса уменьшается, а большая нагрузка приходящая на каждое зерно ускоряет износ алмазного слоя. С понижением зернистости при постоянной концентрации, число одновременно работающих зерен повышается, но пространство в котором должны находиться продукты износа инструмента и обрабатываемой детали понижается. Производительность понижается, режим самозатачивания инструмента нарушается. Учитывая это, концентрацию алмазного порошка с повышением зернистости повышают, а с понижением - понижают.

Марку связки выбирают, учитывая марку порошка, свойства обрабатываемого материала, вид и режим обработки. Связка влияет на производительность процесса, стойкость инструмента, глубину нарушенного слоя. Для обработки оптических материалов

используют многокомпонентные металлические связки, в которых основной компонент медь, железо, алюминий, а добавками служат олово, свинец, цинк и др.

## **2. Изготовление алмазного слоя**

Существует два способа получения алмазного слоя: порошковая металлургия; электрохимическое осаждение алмазного слоя. Суть первого заключается в том, что из алмазосодержащей шихты в пресс-форме с установленным в ней промежуточным кольцом или непосредственно корпусом инструмента при комнатной температуре под давлением  $3 \cdot 10^2$  Па формируют брикет. Для придания ему высокой прочности, износостойкости, точной геометрической формы и размера его спекают при температуре ниже температуры плавления компонентов связки, а потом уплотняют под давлением  $(0,6-1,5)10^2$  Па в нагретом состоянии и охлаждают. Пластическая деформация компонентов связки, нагретых при спекании больше температуры рекристаллизации, обеспечивает прочное закрепление зерен алмаза, равномерно распределенных по всему объему алмазносодержащего слоя. Алмазный слой, спеченный с промежуточным металлическим кольцом, соединяют с корпусом инструмента диффузионным спеканием, пайкой твердым низкотемпературным припоем.

Порошковой металлургией изготавливают инструмент для шлифования плоских и сферических поверхностей, круглого шлифования, нанесения пазов и скосов, распиливания стекла, сверления отверстий.

Электрохимическим осаждением изготавливают инструмент, у которого ширина режущей кромки мала по сравнению с остальными размерами. Используют две разновидности этого способа – гальваностегию – получение тонкого, алмазосодержащего покрытия, прочно соединенного с корпусом во время осаждения, и гальванопластику – получение алмазосодержащих осадков отделяемых от катода. Гальваностегией изготавливают, в частности, алмазные отрезные круги с внутренней режущей кромкой, гальванопластикой – некоторые типы сверл.

## **3. Типы алмазных инструментов**

Инструмент для грубого шлифования сферических и плоских поверхностей нормализован в виде алмазных кольцевых кругов формы АК, кругов алмазных чашечных АЧК и других видов кругов в таблице 18.1. В инструменте используют алмазный порошок марок АСВ, АСК, АСС. Концентрация порошка повышается от 25% до 100% с повышением его зернистости и диаметра инструмента. В единичном производстве грубое шлифование плоских поверхностей, снятие фасок производят алмазными кругами формы АПК в виде планшайб. Марки порошков алмаза и их зернистость аналогичны АЧК и АК, концентрация алмазов 50-100%.

Инструмент для тонкого шлифования сферических поверхностей способом принудительного формообразования аналогичен кругам АК и АЧК, марка алмазного порошка АСН. Зернистость порошка от 28/20 до 14/10. Алмазный инструмент для тонкого шлифования сферических и плоских поверхностей способом притира имеет форму грибов, чашек и планшайб. Рабочую поверхность инструмента образуют алмазосодержащие элементы 1 в виде таблеток, закрепленных на корпусе 2, алмазный порошок типа АСН, концентрация от 10 до 25%.

Инструмент для сверления отверстий изготавливают трубчатой формы. В инструменте используют алмазный порошок марок АСК и АСС. Зернистость от 125/100 до 315/250, повышается с повышением диаметра инструмента, концентрация от 50 до 100%.

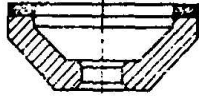

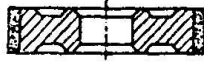

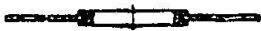
Инструмент для распиливания стекла стандартизован в виде алмазных отрезных кругов - АОК, кругов с внутренней режущей кромкой АКВР, кругов АПС с межсегментными пазами. Алмазный отрезной круг АОК используется для распиливания силикатного и

кварцевого стекла, ситаллов, оптической керамики и кристаллов. Основой кругов является диск из листовой холоднокатаной стали. Алмазная смесь изготавливается гальваническим методом. В инструменте применяют алмазный порошок марки АСК, АСС, зернистость от 630/500 до 125/100, концентрация 25-100% повышается с повышением зернистости алмаза и размера круга.

Алмазный круг с внутренней режущей кромкой АКВР применяют для распиливания полупроводниковых кристаллов. Алмазный порошок марки АН, АСН закреплен на корпусе методом гальваностегии. Алмазные круги с межсегментными пазами применяют для распиливания крупногабаритных заготовок, отливок из стекла. Режущая кромка их состоит из отдельных сегментов, число которых (16-155) зависит от диаметра круга, зернистость алмазного порошка 500/400-250/200, концентрация 50-100%

Инструмент для круглого шлифования пластин и линз - алмазные круги плоского профиля - АПП. В инструменте для центрирования линз методом кругового шлифования применяют алмазный порошок марки АСО, АСВ зернистостью 160/125-50/40 при концентрации 100%.

**Некоторые типы и области применения алмазного инструмента**

Название инструмента	Профиль инструмента	Область применения
Алмазные чашечные круги формы АЧК (ГОСТ 16172—70)		Грубое и тонкое шли- фование плоских сферических по- верхностей
Алмазные кольцевые кру- ги формы АК (ГОСТ 17006—71)		
Алмазные круги плоские прямого профиля фор- мы АПП (ГОСТ 16167—70)		Круглое шлифование пластин, центриро- вание линз
Алмазные плоские круги формы АПК (ГОСТ 17007—71)		Грубое и тонкое шли- фование плоских поверхностей в еди- ничном производ- стве, нанесение фа- сок
Алмазные отрезные круги формы АОК (ГОСТ 10110—71)		Распиливание стекла и кристаллов
Алмазные отрезные круги с внутренней режущей кромкой формы АКВР		Распиливание полу- проводниковых кристаллов
Алмазные отрезные сег- ментные круги (ГОСТ 16115—70, ГОСТ 16117—70)		Распиливание круп- ногабаритных за- готовок стекла

## Лекция 19. Инструмент для шлифования свободным абразивом

### 1. Элементы конструкции инструмента

Для шлифования оптических материалов суспензиями абразивных порошков применяют металлические инструменты – шлифовальники, которые в зависимости от формы обрабатываемой поверхности имеют вид: планшайб, грибов и чашек. К инструменту и материалу, из которого он изготовлен, предъявляют следующие требования:

1. Конструкция должна иметь жесткость, при которой деформация рабочей поверхности инструмента под действием его силы тяжести и приложенной нагрузки имеет минимальную величину.
2. Материал должен быть устойчив к абразивному износу.
3. Материал инструмента должен интенсивно сошлифовывать материал обрабатываемой детали.
4. Не должен вызывать глубокого разрушения поверхностного слоя.

Конструкция планшайб определяется их размером. При диаметре до 300 мм они имеют вид плоского диска с относительной толщиной (отношение толщины к диаметру) от 1/10 до 1/15. Планшайбы диаметром больше 300 мм усиливают кольцевыми и радиальными ребрами жесткости, относительная толщина таких планшайб от 1/20 до 1/30.

Инструменты, имеющие форму грибов конструктивно различны. Так при радиусе до 30 мм, их изготавливают в виде сплошного сферического сегмента. Грибы с большим радиусом кривизны рабочей поверхности для уменьшения массы имеют полость и утолщение в центре корпуса для усиления жесткости. По аналогичному принципу с усилением жесткости в центральной части выполнены конструкции инструмента в виде чашек. Планшайбы, грибы и чашки соединены со шпинделем станка хвостовиками, которые в зависимости от размера инструмента имеют на хвостовике внутреннюю или наружную резьбу М8, М14, М20, М27.

В качестве материала при изготовлении планшайб любого диаметра для грубого и тонкого шлифования применяют серый чугун СЧ28-48 и латунь ЛС59-1Л. При изготовлении грибов и чашек для грубого шлифования применяют сталь 10, сталь 20, чугун СЧ28-48, а для тонкого шлифования латунь ЛС63 и ЛС59-1Л.

### 2. Элементы расчёта шлифовальников

Диаметр планшайб, высоту грибов и глубину чашек определяют исходя из условий, при которых, может быть достигнута минимальная скорость изменения кривизны рабочей поверхности инструмента. Диаметр планшайб  $D_{пл}$  находят по известному диаметру  $D_0$  заготовки или блока заготовок с учётом положения инструмента, который может выполнять функцию как нижнего, так и верхнего звена:

$$D_{пл} = D_0 (1,1 \div 1,25) - \text{инструмент снизу};$$

$$D_{пл} = D_0 (0,8 \div 0,9) - \text{инструмент сверху}.$$

Радиус кривизны  $R^{бл}$  рабочей поверхности блока шлифовальника для каждого перехода определяется по известному радиусу  $R_0$  кривизны поверхности готовой детали, зернистости  $Mn$  абразива, для которой предназначен инструмент и глубине  $\Gamma_{Mn}$  слоя нарушенного этим абразивом, толщине  $A_{Mn}$  - слоя абразива зернистости  $Mn$  находящегося в зазоре между притирающимися поверхностями. Радиус кривизны  $R_{Mn}^{бл}$  поверхности заготовки после шлифования абразивом зернистости  $Mn$  отличается от радиуса  $R_0$  готовой детали на величину  $F_{Mn}$ , соответствующую глубине слоя нарушенного этим абразивом т.е.



$$R_{Mn}^{\bar{bl}} = R_0 \pm 1.2F_{Mn} , \quad (19.1)$$

где коэффициент 1.2 выбирается экспериментально и учитывает возможные колебания зернового состава абразива.

Радиус кривизны  $R_{Mn}^{ил}$  рабочей поверхности шлифовальника (гриба или чашки) изменяется для каждого перехода и должен соответствовать  $R_{Mn}^{\bar{bl}}$  поверхности заготовки после обработки на данном переходе с учётом толщины слоя  $A_{Mn}$  абразива находящегося в зазоре между притираемыми поверхностями, т.е.

$$R_{Mn}^{ил} = R_{Mn}^{\bar{bl}} \pm A_{Mn} = R_0 \pm (1.2F_{Mn} + A_{Mn}) , \quad (19.2)$$

где выбирают «+» – когда рабочая поверхность имеет вид чашки, «-» – когда рабочая поверхность имеет вид гриба. Численные значения параметров  $F_{Mn}$  и  $A_{Mn}$  необходимо выбирать из следующей таблицы, где они указаны для стекла марки К8. Ширину рабочей поверхности выпуклого и глубину вогнутого  $H_{ил}$  определяют в зависимости от их формы и положения.

Так для грибов:  
 $H_{ил} = H_{бл}$  – инструмент сверху;  
 $H_{ил} = (1,2 \div 1,4)H_{бл}$  – инструмент снизу.

Для чашек:  
 $H_{ил} = (0,8 \div 0,9)H_{бл}$  – инструмент сверху;  
 $H_{ил} = (1,1 \div 1,2)H_{бл}$  – инструмент снизу.

Зернистость абразива $Mn$	Глубина $F_{Mn}$ нарушенного слоя, мкм	Толщина $A_{Mn}$ слоя абразива, мкм	
		При положении инструмента	
		снизу	сверху
M28	22	29	31
M20	15	20	27
M14	10	13	19
M10	7	8	14
M7	5	5	11

### 3. Подготовка шлифовальников

Контроль величины радиусов кривизны рабочей поверхности шлифовальников в процессе их изготовления практически невозможен, поэтому критерием оценки соответствия фактического  $R_{Mn}^{ил}$  расчётному значению является радиус кривизны  $R_{Mn}^{\bar{bl}}$  поверхности заготовки после шлифования инструментом, предназначенным для данного перехода. Подготовку шлифовальника выполняют в следующей последовательности:

1. Рабочую поверхность шлифовальников для всех переходов тонкого шлифования протачивают резцом по номинальному значению радиуса кривизны  $R_0$  готовой детали.
2. Осуществляют контроль их формы металлическими радиусными шаблонами.
3. Инструмент для каждого перехода расшлифовывают по вспомогательной заготовке или блоку, используя абразив соответствующей зернистости.
4. Осуществляют контроль полученной поверхности наложением пробного стекла радиуса  $R_0$ .

## Лекция 20. Инструмент для полирования

### 1. Элементы конструкции инструмента

Полировальник представляет собой металлический корпус, на котором закреплен материал (полировочная смола, техническая шерстяная ткань, синтетическая ткань), образующий рабочую поверхность и выполняющий функцию носителя полирующего абразива. В зависимости от формы обрабатываемой поверхности, полировальники имеют вид планшайб, чашек и грибов. (рис.20.1). К корпусу полировальника предъявляют те же конструктивные требования, что и к шлифовальникам. Материал корпуса должен иметь малую плотность и низкую стоимость. Для изготовления корпусов диаметром до 250 мм используют цинковый сплав ЦМ4С. При большем размере корпусов - алюминиевые сплавы АЛ-2, АЛ-9, АЛ-11. Материал, образующий рабочую поверхность полировальника, выбирают в зависимости от требований к точности формы, чистоте обрабатываемой поверхности и интенсивности технологического процесса полирования.

### 2. Элементы расчета полировальников

Размеры полировальников так же, как и шлифовальников, определяют, исходя из условий, при которых может быть достигнуто наиболее равномерное сполировывание нарушенного слоя. Диаметр -  $D_{пол}$  для обработки плоских поверхностей находят из соотношений, аналогичных используемым при определении размеров планшайб для шлифования свободным абразивом, по известному диаметру  $D_0$  заготовки.

$$D_{пол}=D_0(1,1-1,25) \text{ - для полировальника снизу;} \quad (20.1)$$

$$D_{пол}=D_0(0,8-0,9) \text{ - для полировальника сверху.} \quad (20.2)$$

Если в качестве материалов, образующих рабочую поверхность полировальников, используют вещества, у которых отсутствует свойство пластического течения (технические шерстяные ткани, синтетические материалы), то диаметр корпуса  $D_k$  полировальника принимают равным размеру полировальника, т.е.  $D_k=D_{пол}$ . Если же применяются полировальные смолы, обладающие текучестью, что вызывает изменение размера полировальника, то край слоя срезают под углом  $45^\circ$ . В этом случае диаметр корпуса

$$D_k=D_{пол}+2b_0, \quad (20.3)$$

где  $b_0$  - толщина слоя смолы нового полировальника, равная;

$$b_0=0,015D_{пол}+0,5 \text{ (мм).} \quad (20.4)$$

Относительная толщина корпуса полировальника без ребер жесткости составляет не менее 1:6, а полировальника усиленного ими не менее 1:20. При расчете полировальников в виде грибов и чашек определяют радиус кривизны  $R_k$  поверхности корпуса, на которую наносят материал-носитель полирующего абразива, высоту  $H_k$  выпуклого или глубину вогнутого корпуса, соответственно. Исходными данными являются радиус кривизны  $R_0$  поверхности готовой детали, высота или глубина  $H_0$  сферической поверхности блока, его диаметр  $D_0$ . Радиус кривизны  $R_k$  поверхности корпуса полировальника для сферических поверхностей с относительной кривизной  $H_0/R_0 > 0,5$  определяют:

$$R_k = R_0 \pm b_{\text{кон}} \quad (20.5)$$

где  $b_{\text{кон}}$  - толщина слоя материала, образующего рабочую поверхность полировальника к моменту окончания срока его службы. В формуле замена  $b_0$  на  $b_{\text{кон}}$  объясняется тем, что радиус кривизны поверхности выпуклого или вогнутого полировальника изменяется в процессе работы за счет уменьшения толщины смолы в центре. Чтобы разнотолщинность слоя (край-центр) со временем не увеличивалась, а уменьшалась, расчетная толщина слоя должна быть одинаковой по всей поверхности корпуса.

Значение  $b_{\text{кон}}$  увеличивается с увеличением  $R_0$  и находится в пределах 0,4-2 мм. Толщину  $b_0$  слоя материала нового сферического полировальника назначают руководствуясь соотношениями для плоского инструмента. При использовании материалов, не обладающих пластичным течением, под  $b_{\text{кон}}$  подразумевают толщину, определяемую при сжатии измерительным инструментом.

Если относительная кривизна полируемой поверхности  $H_0/R_0 \leq 0,5$ , то разница в толщине слоя материала между центром и краем мала. Значит, радиус кривизны  $R_k$  поверхности корпуса может быть принят равным  $R_0$  поверхности готовой детали, т.е.  $R_k = \pm R_0$ . Если такой корпус не изготавливают специально, а выбирают из набора оптических инструментов нормированных радиусов, то  $R_k^{\text{норм}}$  его поверхности может не соответствовать  $R_0$ . Из-за этого толщины слоя на краях и в центре будут разными, следовательно, допускают его меньшую толщину по краю до  $1/3$  толщины в центре. Проверку выполняют по разности высот фактически имеющегося  $H_k^{\text{норм}}$  и расчетного  $H_k^{\text{расч}}$  корпусов. Для корпусов в виде чашек должно выполняться неравенство:

$$H_k^{\text{норм}} - H_k^{\text{расч}} \leq b_0/3 \quad (20.6)$$

Для корпусов в виде грибов должно выполняться следующее неравенство:

$$H_k^{\text{расч}} - H_k^{\text{норм}} \leq b_0/3. \quad (20.7)$$

Высоту  $H_{\text{пол}}$  выпуклых и вогнутых полировальников определяют по соотношениям для размеров сферических шлифовальников. Размеры корпуса отличаются от размеров полировальника некоторой величиной, связанной с относительной кривизной. Она определяется углом, под которым должен быть срезан край слоя материала, образующего рабочую поверхность полировальника.

У вогнутых полировальников с кривизной  $H_0/R_0 \leq 0,5$  край слоя срезают под углом  $45^\circ$  к рабочей поверхности. Диаметр корпуса в этом случае больше диаметра полировальника на двойную толщину слоя. У вогнутых полировальников с  $H_0/R_0 > 0,5$  слой срезают по образующей корпуса, высота которого больше высоты полировальника на толщину слоя в центре. У выпуклых полировальников с  $H_0/R_0 > 0,5$  высота корпуса может быть равной высоте полировальника или меньше ее на толщину слоя в центре.

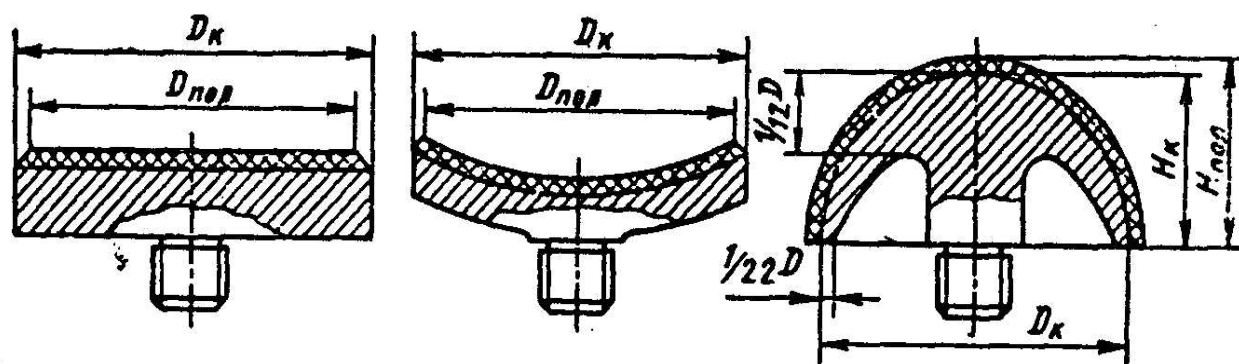


Рис.20.1 Общие конструктивные формы полировальников

## Лекция 21. Охлаждающие и фиксирующие материалы

### 1. Назначение и типы смазывающе-охлаждающих жидкостей

Обработку стекла абразивами, находящимися в связанном и свободном состоянии, выполняют с применением смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ), назначение которых: отвод тепла и продуктов износа из зоны контакта инструмента со стеклом, образование физико-химических взаимодействий в зоне обработки для ускорения разрушения стекла, уменьшение трения инструмента о заготовку. Производительность процесса, качество, потребляемая мощность и сила резания находятся в прямой связи составом, количеством и способом подачи СОЖ в зону контакта инструмента с заготовкой.

При выполнении грубого и тонкого шлифования плоских и сферических поверхностей, сверлении и разрезке, круглом шлифовании, нанесения скосов, пазов и каналов используют СОЖ содержащую эмульсол, воду и керосин. Кроме указанных компонентов для адгезии дисперсированных частиц стекла поверхности рабочей кромки инструмента и их способности к коагуляции в состав СОЖ вводят также кальцинированную соду. Улучшенные свойства имеют 3-5% водные эмульсии содержащие сульфокислоту и глицерин. В результате обменной реакции сульфокислоты с тринатрийфосфатом в масляной среде образуется мелкодисперсная структура, в которой вода и добавки стабилизированы внутри частиц сульфоната. В зоне трения частицы разрушаются. Их активная группа прикрепляется к твёрдым телам, а углеродные радикалы адсорбированные поверхностями алмаза и стекла соприкасаясь, обеспечивают смазку. Вода не имеет доступа к трущимся поверхностям, она поглощает тепло и испаряется. В состав эмульсола добавляют иногда фосфорсодержащие соединения, улучшающие антикоррозионные свойства эмульсии.

При использовании водосодержащих СОЖ и работе инструмента с малой нагрузкой наблюдается его «засаливание». К числу причин вызывающих это явление относится адгезионное взаимодействие частиц разрушенного стекла со связкой инструмента. Если окисление связки происходит быстрее, чем её износ, то образующаяся плёнка окиси будет удерживать на себе частицы стекла. Последние выполняют защитную функцию, замедляют износ связки и удаление затупившихся зёрен алмаза. Режим самозатачивания инструмента нарушается, что приводит к потере режущей способности. Адгезию уменьшают, вводя в СОЖ вещества, которые адсорбируются на связке данного состава лучше, чем стекло.

За критерии оценки СОЖ принимают поверхностное натяжение  $\sigma$  и кислотность pH, оказывающие влияние на производительность процесса шлифования и шероховатость обрабатываемой поверхности. Величины  $\sigma$  и pH зависят от концентрации эмульсии, с её повышением производительность повышается, но одновременно возрастает шероховатость. Оптимальные показатели процесса достигаются при  $\sigma = 380 - 440$  Н/м, pH=9 – 9,2.

### 2. Материалы для крепления заготовок приклеиванием

Такие материалы должны удовлетворять следующим технологическим требованиям: иметь высокую адгезионную способность к материалу заготовки и приспособления; не вызывать упругой деформации заготовок при изменении своего агрегатного состояния; не вносить погрешностей; не вступать химическое взаимодействие с материалом заготовок; легко отставать от поверхности заготовок и приспособления; не требовать их очистки от токсичных и огнеопасных растворителей. Требованиям удовлетворяют: сплавы термопластичных веществ (наклеечные смолы, парафины, воски, шеллак), сублимирующиеся вещества и гипс, водные растворы которые переходят в твёрдое состояние.

*Наклеечные смолы* – это сплавы ряда веществ взятых в определённых весовых соотношениях. Основным компонентом является канифоль сосновая – остаточный продукт переработки естественной смолы (живицы) сосны. Температура размягчения 65 – 80°C,

хорошо растворяется в спирте, ацетоне, эфире, хуже в бензине. Имеет высокую клеящую способность и входит в наклеечные смолы всех марок в количестве 25 – 90%. С повышением содержания канифоли твёрдость и температура размягчения смолы повышаются.

*Пек сосновый* – остаточный продукт переработки дёгтя, получаемый путём термической обработки древесины с большим содержанием смолы. Температура размягчения 45 - 60°C, хорошо растворяется в бензине и ацетоне, хуже в спирте. Является компонентом наклеечных смол большинства марок, где выполняет роль пластификатора, уменьшая вязкость смолы, придавая эластичность и повышая клеящую способность.

*Парафин нефтяной* – это смесь твёрдых углеродов, получаемых из парафиновой нефти. Температура плавления равна 38 – 65°C. Устойчив к действию щелочей и кислот. Является белой кристаллической массой.

*Битум* – продукт из тяжёлых нефтяных остатков, богатых асфальтосмолистыми веществами. Это основные составляющие асфальтены, смолы и нефтяные масла. Первые обуславливают твёрдость, вторые – эластичность, третьи являются разжижающей средой смолы и асфальтены. Температура размягчения твёрдого битума 60 – 90°C. В состав смол вводят в количестве до 2% для повышения упругих свойств.

*Пчелиный воск* – продукт плавления вошины. Имеет кристаллическое строение и представляет собой соединение сложных эфиров, спиртов и кислот. Воск хорошо растворим в ацетоне и бензине, плохо в спирте. Устойчив к действию кислот. В состав смол некоторых марок вводят воск в количестве от 3 до 25% для повышения пластичности.

*Шеллак* – это естественная смола, представляет собой продукт биологической деятельности тропических насекомых. Температура плавления 35 - 40°C, растворим в щелочах и спирте, почти не растворим в эфире и ацетоне. В состав смол некоторых марок его вводят в количестве 40 – 50% для повышения механической прочности.

*Наклеечные воски* – представляют собой сплавы канифоли с воском. Количество канифоли в сплавах 80 – 90%, а воска 10 – 20%. Наклеечные воски применяют для склеивания заготовок между собой и фиксации их положения на технологических приспособлениях. Из-за высокой вязкости толщина клеящего слоя должна быть 0,2 – 0,3 мм.

*Сублимационные клеи* – на основе алкилсодержащих фреонов имеют малую вязкость, что позволяет получать толщину клеящего слоя от 0,002 до 0,003 мм. При этом прочность соединения заготовок с приспособлением в 2-3 раза выше, чем приклеенных смолой. Также клеи отличаются тем, что при нагревании они улетучиваются не вызывая загрязнения на поверхности заготовок и приспособления. Недостатки: необходимость предварительного нагрева заготовок до 60 – 70°C при их соединении и до 120 – 130°C при разборке.

*Сплавы металлов с низкой температурой плавления* в пределах 60 - 90°C по ряду технологических свойств имеют преимущества перед смолами: блок может быть разобран погружением в тёплую воду, что исключает надобность в сложных установках, сокращается расход органических растворителей, малые потери сплава, многократное использование.

*Гипс* – мелкозернистый порошок, получаемый отжигом природного двухводного гипса до его превращения в полуводный. Раствор гипса в воде через некоторое время затвердевает и удерживает заготовки действием сил трения и сцепления. Увеличение объёма затвердевшего раствора гипса характеризуют его удельным расширением, которое нейтрализуют добавляя в гипс цемент 6 – 8% от массы гипса, который при затвердении уменьшается в объёме. С увеличением содержания цемента продолжительность затвердевания раствора сокращается, но затрудняется разборка блока и отделение заготовок. Продолжительность рабочего состояния раствора (время от засыпки гипса в воду до заливки блока) составляет не более 3 мин, а время затвердевания смеси от 4 до 6 часов.

## **Лекция 22. Промывочные, защитные и полирующие материалы**

### **1. Промывочные жидкости**

Жидкости для промывки заготовок и чистки деталей должны быстро и надежно удалять загрязнения, растворять защитные лаки, наклеенные смолы и другие вещества, не содержать взвешенных частиц и растворенных примесей, которые могут загрязнять оптические поверхности, не оказывать разрушающего воздействия на полированные поверхности, не обладать токсичностью и пожароопасностью.

Основными промывочными жидкостями, которые используются на начальной стадии и в конце процесса механической обработки заготовок являются:

1) Чистая вода комнатной температуры для удаления шлифующих и полирующих абразивов с поверхностей обработанных деталей;

2) Водные растворы щелочей для растворения наклеенных смол со шлифованных поверхностей, применяют 5-10% водные растворы NaOH и KOH, которые растворяют воск, парафин, наклеенные смолы и защитные лаки со шлифованных поверхностей обрабатываемых деталей. Полированные поверхности этими растворами не промывают, так как они вызывают их разрушение;

3) Органические растворители и их смеси для растворения наклеенных смол и защитных лаков на полированной поверхности. Бензин хорошо растворяет сосновый пек, воск, жировые загрязнения. Ацетон растворяет канифоль, защитные лаки на основе нитроэмали, жиры, каучук. Этиловый спирт растворяет наклеенные смолы, спиртовые лаки, шеллак.

4) Однопроцентный раствор двухлористого олова в концентрированной соляной кислоте применяют для удаления следов полирующих абразивов по контуру и с фасок обрабатываемых деталей.

### **2. Протирачные материалы**

Для очистки полированных поверхностей перед нанесением покрытий и при сборке используют различные растворители: петролейный эфир; эфир этиловый, спирт этиловый ректификат, спирт ректификат сухой, смесь петролейного эфира со спиртом и другие. Промытые детали вытираются салфеткой из мягких белых тканей (фланель, батист, льняное полотно и др.). Жиры и грязь с поверхностей тканей удаляют обезжириванием щелочью. Для окончательной чистки полированных поверхностей обрабатываемых деталей используют обезжиренную гигроскопическую вату, применяемую и в медицинской практике.

### **3. Защитные лаки**

Лаки применяют для защиты полированных поверхностей от повреждений в процессе их механической обработки. Лаки должны иметь хорошую адгезию к наклеечной смоле и стеклу (оптическим кристаллам), легко отделяться от стекла, не требуя для этого большого количества растворителя. Лаки не должны вступать в химическое взаимодействие со стеклом (оптическими кристаллами), при высыхании должны образовывать гладкую однородную пленку.

Марку лака выбирают в зависимости от вида выполняемой операции, способа соединения заготовок с технологическими приспособлениями, материала заготовки. В частности, полированные поверхности, соединяемые с приспособлением через смоляные подушки, или пропитанными смолой прокладками из ткани, защищают нитроэмалью НЦ-25 (это раствор нитроцеллюлозы, смолы и красящего пигмента в смеси летучих растворителей). Нитроэмаль НЦ-25 используется и для защиты швов соединения заготовок с контактными приспособлениями. Для этих же целей применяют цапонлак (раствор нитроцеллюлозы в летучих органических растворителях с добавлением пластификаторов - соединений ускоряющих затвердевание).

Полированные поверхности химически нестойких стекол (СТК-стекло), водорастворимых и гигроскопичных кристаллов, защищают фторорганическим лаком Ф32Л. Для уменьшения светорассеяния и устранения бликов, создаваемых нерабочими поверхностями и фасками, поверхности окрашивают в черный цвет матовой эмалью ХС-1107 или ПФ-163.

Для увеличения адгезии наклеечной смолы к стеклу и улучшения условий наблюдения дефектов (царапин и точек) на полируемой поверхности на шлифованную поверхность заготовок до их соединения со смоляными подушками дополнительно наносят слой битумного лака.

### **4. Материалы полировальников**

В качестве материалов, образующих рабочие поверхности полировальников, используют:

- 1) технические шерстяные ткани (сукно, фетр);
- 2) полировочные смолы;
- 3) синтетические вещества (полиуритан, синтепол, пилон).

Качество материалов оценивается по производительности процесса, способности образовывать чистую, без видимых дефектов, полированную поверхность и по продолжительности сохранения формы рабочей поверхности, приданной при изготовлении.



Технические шерстяные ткани используют для изготовления полировальников, применяемых в процессах, протекающих с большой интенсивностью, и при изготовлении деталей с низкими требованиями к точности формы поверхности, но высокими к чистоте. Чистоту обеспечивает эластичные свойства ткани, определяющие возможность нивелирования уровня зерен полирующего абразива. Ткань на корпус приклеивается смолой. Для прочности соединения наклеиваемый материал прижимают к корпусу и формуют дополнительно вспомогательным инструментом (планшайбой, грибом, чашкой) под давлением на прессе.

Полировочные смолы представляют собой сплавы соснового пека и сосновой канифоли с добавлением примесей пчелиного воска или канифольного мыла, выполняющих роль пластификатора. Смолы применяют для изготовления полировальников, используемых в процессах получения точных поверхностей деталей из стекла и многих оптических кристаллов. Марку смолы выбирают, учитывая интенсивность процесса и температуру в зоне обработки.

Наличие у смол пластических свойств и способность течь под действием нагрузки ограничивают температурный интервал их применения и возможности интенсификации процесса. Для расширения температурного интервала и повышения стабильности формы поверхности полировальника в процессе его эксплуатации в пеко-канифольные смолы добавляют наполнители: древесные опилки дуба, ольхи, сосны, нефтяной битум, полистирол и др.

Синтетические вещества имеют микропористую структуру. В их состав вводят полирующий абразив (окись церия), зерна которого, насыщая рабочую поверхность инструмента, повышают интенсивность процесса полирования. Отличительная особенность синтетических веществ - высокая износостойчивость, водо- и теплостойкость, значительное сопротивление растягивающим усилиям. Применяют их в процессах с повышенными скоростями и рабочим давлением для полирования деталей из стекла и оптических кристаллов.

С корпусом синтетические вещества соединяют водостойким клеем, температура плавления которого ниже температуры плавления приклеиваемого материала. С повышением требований к точности формы полируемой поверхности толщину материала уменьшают. Соответственно повышаются требования к точности формы поверхности корпуса полировальника.

Четко сформулированных требований к физико-механическим свойствам материалов полировальников пока нет. Однако известно, что максимальную скорость споллировывания имеют вещества, модуль упругости которых лежит в пределах  $(9-29) \cdot 10^2$  Па. Нижний предел соответствует величине упругости, необходимой для передачи стеклу усилий резания от закрепленных абразивных зерен. Верхний предел характеризует упругость, допускающую нивелирование на процесс различных уровней высоты абразивных зерен инструмента в процессе обработки.

## Лекция 23. Технологические приспособления

### 1. Унификация приспособлений

В оптической технологии применяют станочные приспособления общего машино- и приборостроительного назначения. Специфические оптические станочные приспособления применяют лишь для наклейки или зажима заготовок. Используя станочные приспособления стараются:

- 1) устранить выверку положения заготовок;
- 2) повысить точность и производительность обработки;
- 3) расширить технологические возможности оборудования;
- 4) сократить вспомогательное время на установку и закрепления заготовок.

Унификация приспособлений позволяет повысить экономическую эффективность производства. Её ведут по трём направлениям:

- 1) создание универсальных приспособлений обеспечивающих обработку групп деталей;
- 2) создание стандарта на детали приспособлений и их отдельные элементы;
- 3) создание универсально-наладочных приспособлений.

Выбор схемы приспособлений основывается на объединении деталей в группы по видам обработки, габаритным размерам, схемам базирования и закрепления. Базирующие поверхности должны обеспечивать заготовке неизменность положения в процессе обработки, наименьшие погрешности установки, жёсткость и устойчивость под действием закрепляющих усилий, рабочего давления инструмента и нагрева, быструю установку и снятие с приспособлений.

По степени универсальности приспособления делят на: *специальные* (используют для выполнения одной операции или обработки группы конструктивно и технологически однородных заготовок); *непереналаживаемые универсальные* (применяют для обработки различных заготовок с помощью подналадки допускаемые конструкции приспособления); *переналаживаемые многопредметные* приспособления (позволяют обрабатывать различные заготовки за счёт своей универсальной сборно-разборной и агрегатированной конструкции).

Монолитный корпус приспособления объединяет в единое целое отдельные его элементы, он воспринимает усилия, возникающие в процессе закрепления заготовки и её обработки. Корпус должен быть:

- 1) достаточно прочным и жёстким;
- 2) удобным для установки и снятия со станка;
- 3) удобным для установки и снятия заготовок;
- 4) доступным для быстрой очистки приспособления от продуктов износа инструмента и обрабатываемого материала;
- 5) устойчивым к коррозии;
- 6) жаропрочным, кислото-, щелочеустойчивым при использовании во влажной химически агрессивной среде.

### 2. Приспособления для плоского шлифования

Наиболее распространённым типом универсальных приспособлений являются прямоугольные, плоскопараллельные металлические пластины из обычной конструкционной стали 20, на которую с помощью воска или парафина наклеивают обрабатываемые заготовки. Приспособление на столе станка закрепляют винтовыми либо кулачковыми зажимами, либо электромагнитным устройством. Основным недостатком таких приспособлений является длительность операции крепления и снятия заготовок на приспособлении.

Более совершенны приспособления, работа которых основана на использовании механических упоров и поверхностью натяжения жидкой плёнки. Упоры воспринимают основные усилия резания, а тонкий слой воды между базовыми поверхностями и заготовок предотвращает вибрации заготовок и их самопроизвольное отжатие.

Для обработки боковых поверхностей заготовок некруглой формы используют многоместные универсальные и специальные приспособления, показанные ниже на Рис.23.1. Такое приспособление выполнено в виде угольника 1 с базовым углом, смоченные водой склеенные заготовки 2 укладывают столбиком и зажимают винтом через прокладку 3.

Для грубого шлифования призм, собранных в столбики применяют приспособления с соответствующим расположением опорных поверхностей (Рис.23.2). Погрешности выполнения угловых и линейных размеров приспособлений должны быть в 1,5 – 2 раза меньше, чем у обрабатываемых заготовок. Погрешность выполнения угловых размеров призм и клиньев при использовании этого типа составляет 2 – 5 мин, а пирамидальность столбиков 0,05 – 0,01 мм.

В последнее время находят широкое распространение многоместные многопозиционные приспособления в виде делительных устройств, применяемых для установки обрабатываемых заготовок, составленных или склеенных в столбик, в различные положения.

### **3. Приспособления для сферошлифовальных и центровочных операций**

При обработке сферических и асферических поверхностей одиночных осесимметрических заготовок и блоков используют цанговые и пневматические приспособления, выполняющие центрирующие зажимные функции. Схема цангового приспособления показана на Рис.23.3. Основание цанги 1 имеющей прорези 2 жёстко крепится на верхнем торце шпинделя станка. Центрование и зажим заготовки осуществляется осевым перемещением штока 3 имеющего на верхнем конце кольцо 4 зажимающее заготовку 5. Вертикальное перемещение штока может происходить как от механического, так и от пневматического привода.

Применяют также вакуумные зажимные патроны, схема которых показана на Рис.23.4. В таком приспособлении его корпус 1 жёстко закреплён на торце шпинделя станка. При нажатии заготовка 2 преодолевая сопротивление пружины толкателя 3, прижимается к опорной плоскости корпуса. Для обеспечения вакуум плотного соединения в корпусе имеется кольцевая канавка, в которую вставлено резиновое кольцо 4. При впуске воздуха в патрон пружина, разжимаясь, перемещает толкатель вверх и выталкивает заготовку.

На центровочных станках применяют два вида патронов. На станках где оптическую ось линзы 3 совмещают с осью вращения шпинделя наблюдая за угловым биением изображения нити накала лампы отражённого от поверхности устанавливаемой линзы применяют патроны, схема которых показана на Рис.23.5. В таком патроне хвостик 1 из стали 50 напрессовывается линза 2 из латуни ЛС59-1. Латунь этой марки благодаря осыпной стружке обеспечивает хорошее качество подрезания острого края и быстрый нагрев (охлаждение) смолы 4 и гильзы 2 в процессе работы.

На самоцентрирующих станках применяют стальные центрировочные патроны с конической базовой поверхностью (Рис.23.6). Такие патроны изготавливают из бромистых сталей с последующей закалкой, обеспечивающей наиболее низкий коэффициент трения по стеклу и износостойкость.

Для нанесения фасок на линзу с толстым краем применяют вакуумные зажимные патроны. Хвостовик зажимных патронов выполняют из стали 50, а гильзу и кольцо- из латуни ЛС 59-1.

#### 4. Наклеечные шлифовально-полировальные приспособления

Хвостовики таких наклеечных приспособлений согласовывают с посадочными местами шпинделей станков и позволяют закреплять их непосредственно на шпинделе или через переходные втулки. Конструктивные формы наклеечных приспособлений для эластичного крепления заготовок линз в основном аналогичны конструкциям шлифовальников и полировальников сферической формы. Приспособления диаметром до 500 мм изготавливают из серого чугуна СЧ 12-28 методом литья с последующей проточкой посадочных мест. Приспособления больших размеров изготавливают комбинированными: корпус из сплава АЛ2, а резьбовая втулка из стали 40.

Наклеечные приспособления типа грибов и чашек для жёсткого крепления заготовок изготавливают из чугуна литьём в кокиль и последующим точением, пластмассовые – литьём под давлением пластмассы АГ-4. Комбинированные приспособления, схема которых показана на Рис. 23.7 имеет корпус 1 из сплава типа АЛ2 с запрессованным хвостовиком 2 из стали 40 или корпус из пластмассы АГ-4, армированный латунной резьбовой втулкой – хвостовиком. Иногда хвостовик соединяют с корпусом через подшипник качения.

Для крепления некоторых тонких заготовок, например, колпаков 3 применяю вакуумные одноместные патроны, схема которых показана ниже на Рис 23.8. Вакуум создаётся с помощью эластичной диафрагмы 2, изготовленной из резины толщиной от 2 до 4 мм. Корпус 1 отливают из сплава АЛ2, шток 4 и другие крепёжные детали изготавливают из нержавеющей стали.

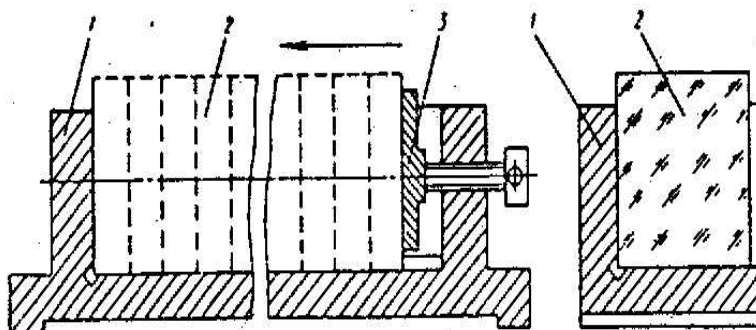


Рис.23.1. Приспособление для обработки торцов заготовок некруглой формы

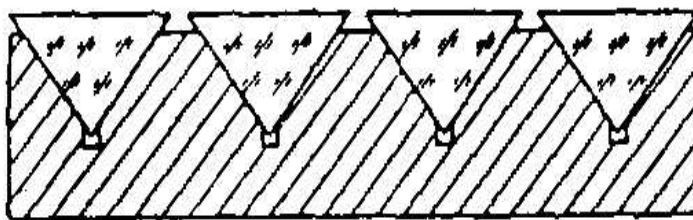


Рис.23.2. Приспособление для обработки призм

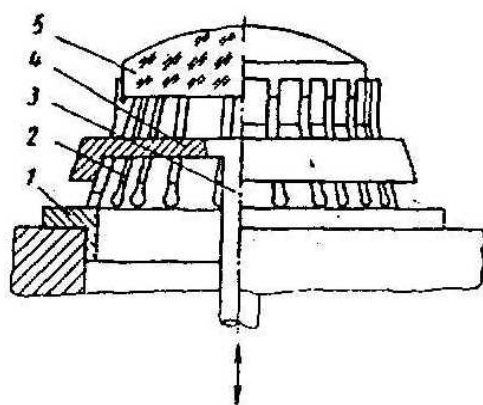


Рис.23.3. Цанговое приспособление

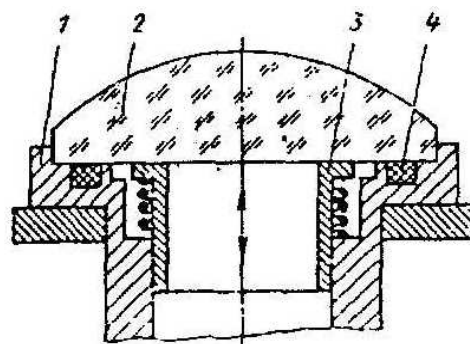


Рис.23.4. Вакуумное приспособление

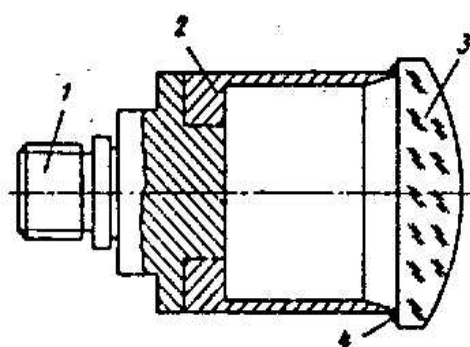


Рис.23.5. Латунный центровочный патрон

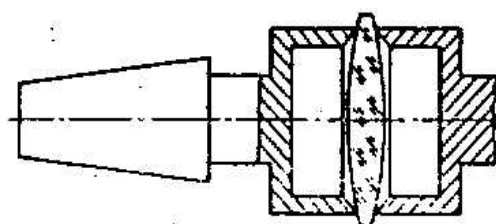


Рис.23.6. Стальные центровочные патроны

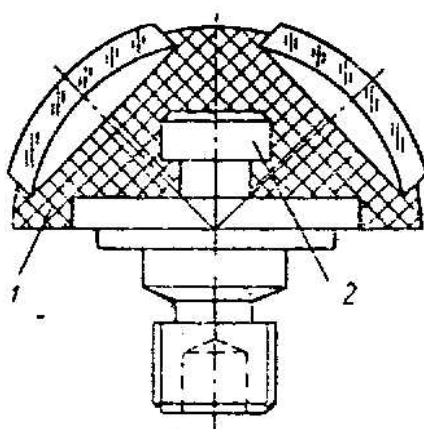


Рис.23.7. Комбинированное неклеечное приспособление

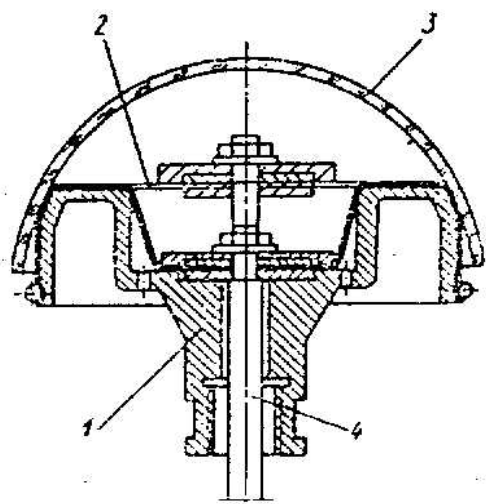


Рис.23.8. Вакуумное стальное приспособление

## Лекція 24. Допуски на механічну обробку

### 1 Допуски на розміри заготовок

Вибір оптимальних допусків має велике техніко-економічне значення при проектуванні технологічних процесів, так як завищення допусків зводить до перевитрат матеріалів, інструментів, збільшення трудомісткості і собівартості виготовлення деталей. Занижені допуски збільшують матеріальний брак, потребують підвищеної точності установки заготовок на пристосуваннях тощо.

В оптичному виробництві використовують дослідно-статистичний метод встановлення допусків, основу якого складають систематизовані і узагальнені дані підприємств. Дослідно-статистичні значення допусків завищені порівняно з розрахунково-аналітичними, так як в них вкладають такі вимоги виготовлення заготовок та їх механічної обробки, при яких можливий мінімальний матеріальний і технологічний брак.

Допуск  $z_t$  на товщину по осі заготовки лінз та пластин встановлюють від верхньої межі допуску на розмір готової деталі. Величину  $z_t$ , яка лежить в межах від 1,8 до 8,0 мм, призначають в залежності від діаметра  $D_0$  округлих або найбільшої сторони неокруглих пластин:

$$z_t = 0,014 D_0 + 1,22 \text{ мм.} \quad (24.1)$$

Допуск  $z_d$  на діаметр встановлюють від номінального розміру готової деталі - від 1,5 до 12 мм. Призначають  $z_d$  так само, як і допуск на товщину по осі, в залежності від діаметра деталі. При товщині краю більше 0,3 мм:

$$z_d = 0,022 D_0 + 1,05 \text{ мм.} \quad (24.2)$$

При товщині менше 0,3 мм обводова зона заготовки деформується у процесі обробки і ускладнює формоутворення. Зменшуючи допуск на діаметр, збільшують товщину краю заготовки, а також і її жорсткість.

Допуски на радіуси кривизни  $R_3$  сферичних поверхней пресованих заготовок встановлюють в залежності від призначеного раніше допуску  $z_t$  на товщину по осі і коефіцієнта  $k$ , передбачаючи потовщення або потоншення заготовок по краю. Радіус збільшують (+) при обробці з краю та зменшують (-) при обробці у центрі:

$$\text{для випуклих поверхонь: } +R_3 = +R_0 + z_t / 2 \cdot k; \quad (24.3)$$

$$\text{для увігнутих поверхонь: } -R_3 = -R_0 + z_t / 2 \cdot k, \quad (24.4)$$

де  $R_0$  - радіус кривизни поверхонь готової деталі. Коефіцієнт  $k$  знаходять із формули:

$$k = (R_0 / D_0)^2 \quad (24.5)$$

або побудованої по ньому номограмі,  $D_0$  - діаметр деталі.

Допуски на довжину  $z_L$  і ширину  $z_{\Pi}$  неокруглих пластин встановлюють від номінального розміру готової деталі. Їх значення (від 0,5 до 4,0 мм) призначають по розміру найбільшої сторони деталі.

Допуски на розміри заготовок призм встановлюють від верхньої межі допуску на розмір готової деталі і призначають по найбільшій її стороні. На чистих поверхнях пресованих заготовок призм допуск складає 1,2 - 2,0 мм, а на забруднених 1,5 - 2,7 мм.

## 2. Допуски на шліфування і полірування плоских та сферичних поверхонь

Загальний допуск  $z_t$  складається із його проміжних значень, встановлюваних на кожну операцію і перехід, що передбачені технологічним процесом. Треступеневий процес механічної обробки поверхней включає операції: грубе шліфування, тонке шліфування, полірування, відповідно:

$$z_t = z_t^a + z_t^b + z_t^c. \quad (24.5)$$

На операцію грубого шліфування відводять частину допуску  $z_t$ , після усунення якого товщина заготовки

$$t = t_0 + \Delta t + F^a, \quad (24.6)$$

де - глибина шару, порушеного грубим шліфуванням,  $t_0$  - номінальна товщина деталі по осі,  $\Delta t$  - плюсовий допуск на товщину деталі по осі.

Допуск на тонке шліфування і полірування сумарно дорівнює глибині шару, порушеного грубим шліфуванням:

$$z^b + z^c = F^a. \quad (24.7)$$

Тонке шліфування вільним і зв'язним абразивом виконують в більшості технологічних процесів у два переходи. На кожний відводять частину допуску, рівну різниці в глибині шарів, порушених абразивом  $M_{n-1}$  попереднього і абразивом  $M_n$  даного переходу, таким чином:

$$z^b = z_{tM_{n-1}}^b + z_{tM_n}^b, \quad (24.8)$$

де

$$z_{tM_{n-1}}^b = F^b - F_{tM_{n-1}}^b, \quad z_{tM_n}^b = F_{tM_{n-1}}^b - F_{tM_n}^b \quad (24.9)$$

Допуск на полірування відповідає глибині шару, порушеного абразивом останнього переходу операції тонкого шліфування, таким чином  $z_t^c = F_{tM_n}^b$ .

Практично, враховуючи похибки базування заготовок на пристосуваннях, маючи на увазі можливість виникнення на оброблюваних поверхнях дефектів у вигляді подряпин, виолок, крапок, передбачаючи також можливість ряду інших виробничих похибок і складність контролю фактичної товщини знятого шару, допуск на операції тонкого шліфування і полірування кожної поверхні збільшують (до 0,15 мм).

Номінальні розміри заготовок товщину, діаметр, довжину, ширину - визначають з врахуванням відповідного номінального розміру готової деталі, поля допуску на даний розмір, допуску на механічну обробку і допуску згідно з ГОСТ 13240-78 на розмір заготовок, виготовлених методом пресування.

## Лекция 25. Покрытия оптических поверхностей

### 1. Типы покрытий и их назначение

На преломляющие и отражающие поверхности деталей наносят тонкие прозрачные плёнки различных веществ (металлов, диэлектриков, полупроводников, органических и кремнийорганических полимеров и др.). С их помощью изменяют оптические, химические и электрические свойства деталей. По назначению покрытия разделены на несколько типов.

*Отражающие (зеркальные)* покрытия отражают от поверхности падающей на нее световой поток; характеризуются коэффициентом отражения  $\rho$ .

*Светodelительные (полупрозрачные)* покрытия разделяют падающий на поверхность световой поток на отраженный и проходящий; характеризуют отношением коэффициентов отражения и пропускания  $\rho/\tau$  и коэффициентом поглощения света деталью.

*Просветляющие покрытия* увеличивают поток проходящего света за счет уменьшения отражения на границе раздела сред с различными показателями преломления; характеризуются остаточным коэффициентом отражения  $\rho$ .

*Фильтрующие* интерференционные и нейтральные покрытия переменной плотности предназначены для выделения из падающего светового потока определенной области спектра или его равномерного ослабления по всему спектру. Эти покрытия характеризуются коэффициентом пропускания  $\tau_\lambda$  или отражения  $\rho_\lambda$  при данной длине волны, шириной спектрального интервала на половине максимума пропускания  $\delta_{\lambda 0,5}$ .

*Защитные покрытия* повышают химическую устойчивость поверхностей детали или покрытий других типов, увеличивают их поверхностную прочность.

*Токопроводящие покрытия* предохраняют детали от обмерзания, запотевания, снимают накапливающие электростатические заряды.

*Поляризующие покрытия* позволяют получить линейно поляризованный свет в узкой области спектра; характеризуются степенью поляризации проходящего и отраженного светового потока в определенном участке спектра.

К числу свойств, характеризующих покрытия, помимо оптических относятся химическая и коррозионная устойчивость, механическая и термическая прочность.

Каждый тип покрытия имеет несколько разновидностей, отличающихся материалом пленки, способом ее нанесения, защиты и т.п. В зависимости от этого пленки имеют различные свойства. Тип и разновидность покрытия выбирают в зависимости от материала детали, предъявляемых к ней требований, условий эксплуатации и др.

Способы нанесения покрытий разделяют на химические и физические. Химические основаны на реакциях, которые протекают в пленкообразующих веществах на поверхности детали или при их взаимодействии с последней. К ним относятся травление (Т), осаждение из растворов пленкообразующих веществ (Р), обработка в парах и газах (Г), электролиз (Е), нанесение расплава (Н), нанесение кистью или пульверизатором (П). Физические способы основаны на испарении и конденсации веществ в вакууме, в том числе испарение (И), катодное распыление (К), испарение с помощью электронного нагрева (ИЭ).

### 2. Обозначение покрытий

Всем типам покрытий присвоены условные символы (Таблица 25.1), пленкообразующим материалам – условные номера (Таблица 25.2), а способам нанесения соответствующие буквенные знаки. На чертежах оптических деталей покрытия обозначают несколькими последовательно записываемыми знаками: символ типа покрытия – сокращенное название – номер, присвоенный материалу пленки – способ ее нанесения. При



обозначении покрытий, состоящих из двух, трех и большего числа слоев, указывают материал и способ его нанесения последовательно для каждого слоя.

Таблица 25.1






Тип покрытия	Сокращенное наименование	Обозначение на чертеже	Тип покрытия	Сокращенное наименование	Обозначение на чертеже
Отражающие:	Зеркальн.		Фильтры	Фильтр.	
Внешние.	Зеркальн.		Защитные	Защитн.	
Задние.	Зеркальн.		Токопроводящие	Токопров.	
Светоделительные (полупрозрачные)	Светоделит.		(обогревающие)	(или обогрев.)	
Просветляющие	Просветл.		Поляризующие	Поляриз.	

Таблица 25.2

Материал	Условное обозначение	Способ нанесения и его условное обозначение	Материал	Условное обозначение	Способ нанесения и его условное обозначение
Алюминий	1	Испарение в вакууме (И)	Серебро азотнокислое	25	Осаждения из гидролизующихся растворов (Р)
Золото	2		Торий азотнокислый	30	
Никель	4		Кремниевый эфир	43	
Палладий	5		Титановый эфир	44	
Серебро	8		Смесь титанового и кремниевого эфиров	45	
Хром	9		Медь	3	Электролиз (Е)
Титан	15		Палладий	5	
Стронций фтористый	18		Фосфорнокислый аммоний	21	Травление (Т)
Магний фтористый	24		Азотная кислота	61	
Сурьма трехсернистая	27		Уксусная кислота	63	
Цинк сернистый	29	Нанесение расплава (Н)	Лак бакелитовый	72	Кистью, пульверизатором (П)
Моноокись кремния	31		Лак бутерально-бакелитовый с наполнителем	75	
Парафин	84				
Воск	85				

### 3. Химические способы нанесения покрытий

Травление – способ образования пленки, основанный на химическом взаимодействии стекла с водой или водными растворами кислот. В результате травления из поверхностного слоя извлекаются все растворимые компоненты, и остается тонкая пленка кремнезема, показатель преломления которой  $n_e = 1,44 \div 1,45$ . Основную роль в процессе выполняют подвижные ионы водорода. В воде их концентрация, в которых концентрация ионов водорода больше, соответственно возрастает и скорость роста пленки. Время достижения ею определенной толщины зависит от химической устойчивости стекла, условий процесса и может составлять от нескольких минут до сотен часов. Показатель преломления пленки  $n_{пл}$  меньше, чем у всей массы стекла  $n_{ст}$ , поэтому пленка представляет собой однослойное просветляющее покрытие. Полностью устранить отражение света данной длины волны  $\lambda$  она может при оптической толщине  $n_{пл} h_{пл} = \frac{1}{4} \lambda$  и показателе преломления  $n_{пл} = \sqrt{n_{ст}}$ .

Последнее условие выполнимо лишь для стекол с  $n_e = 1,9 \div 2,0$ , для остальных в зависимости от величины  $n_e$  отражение может быть лишь уменьшено. Так у стекла с  $n_e = 1,71 \div 1,75$  оно

снижается до 15%, а у стекол с  $n_e=1,51\div 1,52$  до 50% от исходной величины. Технология образования покрытия состоит из подготовки поверхности, её травления, сушки и контроля. Равномерность толщины и скорость образования плёнки зависят от чистоты поверхности, поэтому предварительно её обрабатывают 0,5н раствором щелочи (NaOH).

Травление выполняют в водных растворах кислот, концентрация которых определяется химической устойчивостью стекла. Чаще всего используют 0,1н раствор уксусной кислоты, которая хоть и образует плёнку медленнее, чем серная или азотная кислоты, но не так летуча и агрессивна по отношению к аппаратуре, менее вредна для исполнителя. После получения плёнки необходимой толщины деталь промывают и сушат. Толщину плёнки контролируют или непосредственно в процессе травления (по изменению интерференционной окраски), или измерением пропускания (отражения) света готовой деталью. Толщина и показатель преломления таких плёнок при хранении не меняется. После старения они имеют самую высокую (нулевую) группу прочности, устойчивы в воде, кислотах, органических растворителях.

Образовавшаяся в результате травления поверхностная плёнка кремнезема наряду с эффектом просветления выполняет защитную роль, затрудняя диффузию паров воды, вглубь стекла, и предохраняет его тем самым от дальнейшего разрушения. Степень защиты зависит от химической устойчивости стекла. У стекол, содержащих в своём составе мало  $\text{SiO}_2$  и много окислов таких, например, как  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{PbO}$ , образующих легкорастворимые и гидролизующиеся соединения, плёнка имеет крупные поры и защитного действия практически не оказывает.

К недостаткам данного способа нанесения покрытий относятся возможность восстановления царапин, закрытых продуктами износа стекла, большое время роста плёнки на химически стойких стёклах, необходимость изменения режима травления для стекол различных марок и др. Просветляющие плёнки наносят травлением в тех случаях, когда нельзя использовать другие способы их образования (детали больших размеров или сложной формы). На склеиваемые детали плёнку наносят до их соединения.

*Плёнкообразующие растворы* представляют собой растворы гидролизующихся соединений. Образование плёнок – это процесс постепенного изменения химического состава исходного вещества. Изменения происходят в растворе в стадии формирования плёнки на поверхности стекла и при термообработке. Способность образовывать стабильные плёнки преимущественно высшие окислы элементов типа  $\text{R}_2\text{O}_3$ ,  $\text{RO}_2$ ,  $\text{R}_2\text{O}_5$ . В качестве плёнкообразующих соединений используют эфиры ортокислот, растворы некоторых неорганических соединений в спирто- и ацетоноводных смесях, мономеры и полимеры кремнийорганических соединений. Прочность сцепления плёнки с подложкой зависит от природы материала подложки, вещества плёнки, её толщины, структуры поверхности подложки, её температуры в процессе нанесения плёнки и при термообработке, относительной влажности и температуры воздуха помещения и др. Наибольшая адгезия плёнки к поверхности стекла имеет место при наличии в составе плёнкообразующих веществ функциональных групп  $\text{OH}$ ,  $\text{NH}_2$ ,  $\text{OC}_2\text{H}_5$  и других, которые обеспечивают закрепление плёнок за счёт химических связей.

Из растворов гидролизующихся соединений образуют плёнки всех типов толщиной от 5 до 5 000 нм, а на материалах, имеющих высокую термическую стабильность, в частности на кремнии, до 30 000 нм. Технология образования плёнок сводится к следующему: деталь закрепляют на вертикальном шпинделе и приводят во вращение с частотой от 2000 до 20 000 об/мин (в зависимости от размера). После подготовки поверхности (чистки, промывки) на её центр в строго дозированном количестве подают раствор плёнкообразующего вещества. Под действием центробежной силы раствор растекается равномерным слоем. Толщину плёнки регулируют количеством раствора, его концентрацией, вязкостью и содержанием воды, скоростью вращения детали.

*Пиролиз* заключается в обработке поверхности детали парами разлагающихся при нагреве солей металлов, полупроводников, кремнийорганических соединений. Этим способом наносят токопроводящие и защитные покрытия. Установка для нанесения токопроводящих пленок (Рис.25.1) представляет собой шахтную электрическую печь 1 с нагревателем 2. В печь входит вал 3 с держателем детали 4. В нижней части печи на откидном кронштейне укреплен печь-испаритель 5 нагревателем 6 и тиглем 7 для испаряемого вещества 8. Для нанесения пленки деталь закрепляют в держателе и нагревают обе печи. По достижению тиглем температуры, соответствующей температуре разложения испаряемой соли, открывают шибер 9, отделяющий печь-испаритель от печи-нагревателя, и пары вещества приходят в соприкосновение с деталью. После того, как пленка получит определенный цвет, который коррелирует с ее электрическим сопротивлением, шибер закрывают. Толщина пленки зависит от времени обработки парами, а электропроводность от температурного режима печи. Процесс нанесения пленки пиролизом складывается из последовательно выполняемых операций: чистки поверхности детали, ее закрепления, нагрева установки, нанесения пленки, контроля ее сопротивления, охлаждения детали и снятия с установки.

#### **4. Физические способы**

*Термическое испарение* заключается в том, что пленкообразующее вещество 1 (Рис.25.2) вместе с подложками 2 помещают в вакуумную камеру 3, из которой воздух откачивают через отверстие 6 до  $(1,3 - 0,6)10^{-3}$  Па. Вещество нагревают до температуры испарения. Конденсируясь, оно оседает на поверхности подложек, образуя пленку. Толщину пленки контролируют в процессе испарения с помощью фотометрических устройств, измеряя пропускание и отражение света. Испарители 4 могут быть установлены в верхней, средней или нижней частях камеры в зависимости от рода работы. Их число и расположение определяют исходя из требований к равномерности толщины пленки. Материал испарителей – молибден или вольфрам, температура испарения, которых соответственно 2480 и 3230°C. Нагрев испарителей осуществляется электрическим током большой силы, поступающим от блока питания 5.

Требуемое разрежение в камере создают откачкой воздуха последовательно двумя насосами: форвакуумным (ротационным) – приблизительно до 1,3 Па и диффузионным (пароструйным) – до необходимой степени разряжения. Испарением наносят пленки из веществ с низкой температурой плавления и высоким давлением пара (щелочных и щелочноземельных металлов, сульфидов, фторидов).

Процесс нанесения покрытий состоит из ряда последовательно выполняемых операций: подготовки подложек (промывки, обезжиривания, чистки); подготовка вакуумной камеры (промывки колпака, подколпачной арматуры, загрузки испарителей пленкообразующим веществом, установки подложек и др.); откачки вакуумной камеры форвакуумным насосом до разрежения  $\approx 1,3$  Па; обработки подложек тлеющим разрядом; откачки камеры диффузионным насосом до разряжения  $(1,3-0,6)10^{-3}$  Па при одновременно работающем форвакуумном насосе; прогрева испаряемого вещества при экранировании подложек заслонкой для предупреждения нанесения внешнего загрязненного слоя вещества; испарения вещества на поверхность подложек; разгерметизации вакуумной камеры.

Способ термического испарения имеет ряд недостатков: изменяется содержание компонентов при испарении веществ сложного состава, образующаяся пленка не равномерна по толщине при испарении веществ из точечных источников на поверхность значительного размера, затруднено испарение тугоплавких веществ, мала прочность сцепления пленки с подложкой.

*Катодное распыление* – процесс, при котором происходит перенос вещества катода на подложки, находящиеся вблизи анода. При возникновении электрического разряда в газе катод под действием ионной бомбардировки разрушается. Часть осажденных атомов осаждается на подложки, часть возвращается обратно в результате столкновения с молекулами газа.

Катодное распыление может проводиться на постоянном токе и на переменном токе высокой частоты. На постоянном токе в атмосфере инертного газа можно наносить только металлические пленки. В атмосфере активного газа получают пленки окислов металлов. Распылением на переменном токе в необходимой среде можно получать пленки любых соединений. Способ нанесения пленок в присутствии небольших количеств активного газа называют реактивным распылением.

Катодным распылением наносят просветляющие, светоделительные, фильтрующие и защитные пленки из тугоплавких металлов, диэлектриков, полупроводников. Основное преимущество способа – отсутствие фракционности и возможность получения пленок, состав которых отвечает термически и химически устойчивым соединениям, что необходимо для деталей приборов, работающих в условиях повышенной влажности и высокой температуры. Адгезия пленок к поверхности стекла и их твердость выше, чем у получаемых термическим испарением.

Для катодного испарения используют установки, которые отличаются от применяемых при термическом испарении меньшей высотой камеры (из-за небольшого расстояния между электродами) и подколпачным устройством. В вакуумной камере 1 (Рис.25.3) размещены анод 2, выполняющий роль держателя заготовок (подложек) 3 и катод 4 из распыляемого вещества. Процесс ведут при давлении в камере 0,13 Па. При подаче на катод и анод небольшого напряжения от источника питания 5 поверхность подложек бомбардируется положительными ионами и очищается от загрязнений. После подачи на катод отрицательного потенциала в несколько сотен вольт начинается его интенсивная бомбардировка положительными ионами. Выбитые атомы катода осаждаются на поверхности подложек. Для получения пленки равномерной толщины размер катода должен превышать размер подложки, а форма его поверхности соответствовать форме поверхности подложки. Технологический процесс нанесения покрытий катодным распылением близок к процессу термического испарения.

*Испарение веществ электронно-лучевым нагревом* также используют для получения пленки. С помощью электронных пучков получают поток энергии большой концентрации мощности на сравнительно малой поверхности испарения (до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>). Практически точечная фокусировка электронного пучка позволяет получить высокую температуру и большую скорость испарения тугоплавких веществ. Пленки отличаются чистотой и однородностью состава, так как можно избежать непосредственного контакта горячей зоны испаряемого вещества с материалом испарителя. Легко осуществляется регулировка температуры нагрева и скорости испарения.

Установка (Рис.25.4) представляет собой вакуумную камеру 1, внутри которой размещены подложки 2, мишень 3 с испаряемым веществом 4, анод 5, и катод 6. Питание подается от источника 7. Используются многопозиционные электронно-лучевые испарители, наносят многослойные покрытия.

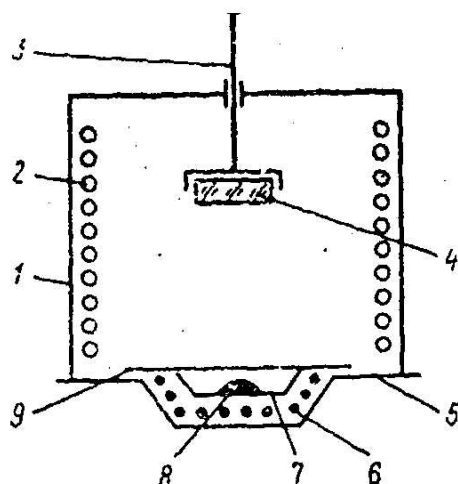


Рис.25.1. Схема установки для нанесения плёнок пиролизом вещества

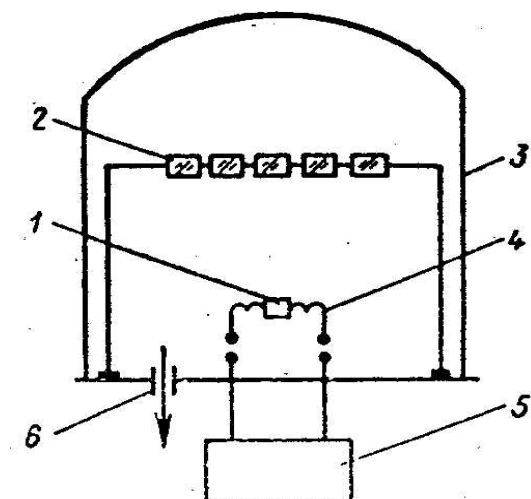


Рис.25.2. Схема вакуумной установки для термического испарения вещества

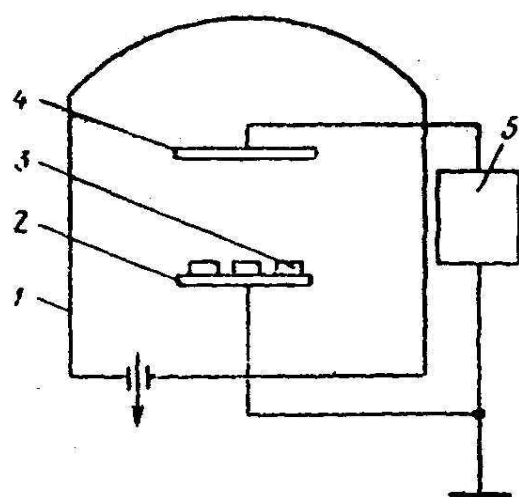


Рис.25.3. Схема устройства катодного распыления вещества

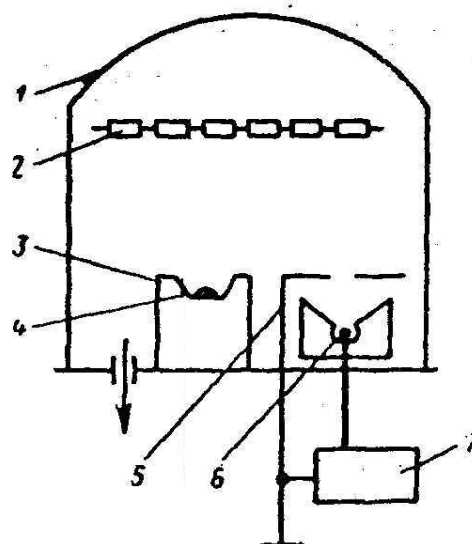


Рис.25.4. Схема установки испарения вещества электронно-лучевым нагревом

## **Лекция 26. Соединения оптических деталей между собой**

### **1. Соединение склеиванием**

Склеивание это наиболее распространенный способ соединения оптических деталей в приборостроении. Склеивание линз необходимо для точной фиксации их взаимного расположения, уменьшения количества света отраженного свободными поверхностями.

Линзы наиболее часто соединяют клеями бальзамин, ОК72-Ф, ОК-50 при комнатной температуре (20-22°), которые находясь в жидком состоянии не требуют предварительного прогрева компонента для процесса полимеризации. Перед склеиванием проводят дополнительно операцию комплектования линз по толщинам. Такая комплектация позволяет суммировать погрешность соединения линз, что исключает снижение качества изображения формируемого склейкой. Кроме того, она создает определенные удобства при сборке прибора. Линзы комплектуют так, чтобы алгебраическая сумма отклонений их толщины приблизительно равнялась (приближалась) нулю. У трехлинзовых компонентов отклонение толщины одной из линз должно равняться по абсолютной величине и быть противоположным по знаку значению суммарной толщины двух других линзовых компонентов. Склеивание предварительно скомплектованного (например, двухлинзового компонента) состоит из последовательно выполняемых технологических операций:

1) подготовка деталей и клея (соединяемые поверхности промывают, чистят, накладывают одну на другую). Полимеризующийся клей готовят в количестве с учетом продолжительности его рабочего состояния, т.е. до затвердевания;

2) процесс склеивания: сняв положительную линзу, на поверхность отрицательной наносят необходимое количество клея. Вновь установив положительную линзу и прижимая ее к нижней (отрицательной) линзе обеспечивают толщину слоя клея от 0,005 до 0,2 мм. С уменьшением толщины слоя клея механическая прочность, морозостойкость соединения повышается;

3) центрирование компонентов: до завершения полимеризации (затвердевания клея) совмещают оптические оси склеиваемых деталей. Для этого используют различные технологические приспособления, которые позволяют выполнять центрирование и контроль их несоосности. Такие устройства собирают из микроскопов, колиматоров, интерферометров и т.д.

Нанесение на линзы просветляющих пленочных покрытий физическими способами должно предшествовать их склеиванию поскольку при обработке деталей их нагревают до 200-300°С, это нагревание вызывает изменение свойств клея.

Особенности склеивания призм заключаются в следующем. Склеивание выполняется так же как и у линз. Существенно отличаются лишь конструкции контрольно-юстировочного приспособления, используемого при соединении призм различных типов. Большинство призм из оптических материалов прозрачных в видимой области спектра склеиваются бальзамином и клеем ОК-72Ф. Призмы из материалов прозрачных в ультрафиолетовом

диапазоне склеивают клеем УФ-235, а из материалов прозрачных в инфракрасном диапазоне склеивают клеем ТКС. Сложные призмы, состоящие из нескольких деталей, склеивают в той же последовательности, что и многолинзовые компоненты. Полупрозрачные зеркала склеивают бальзамином, ОК-72Ф, ОК-50. Процесс склеивания таких деталей такой же, как и при склеивании линз.

## **2. Глубокий оптический контакт**

Глубокий оптический контакт (ГОК) это бесклеевое соединение оптических деталей, заключающееся в следующем. На одну или обе соединяемые поверхности наносят тонкую пленку кремнезема. Устанавливают эти поверхности на оптический контакт, а затем подвергают эти компоненты термической обработке (прогрев при температуре 250°), то кислород и кремнезем образуют химические связи, прочность которых равна прочности монолитного стекла. Полученные соединения становятся неразъемными. Глубокий оптический контакт расширяет область применения оптического контакта, заменяет спекание и сварку. Применение его целесообразно при создании сложных узлов, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях (резкие перепады температур, высокая влажность, наличие окружающих сред исключающих применение клеев), а так же для упрощения крепления узлов, повышения их механической прочности. Собранные таким способом узлы устойчивы при работе в условиях высоких (до 500° для силикатного, до 1500° для кварцевого стекол) температур, в агрессивных средах (кислоты, щелочи, органические растворители), при механических воздействиях (вибрация, удар, ускорение, нейтронном и  $\gamma$ -облучении).

## **3. Соединение спеканием и сваркой**

Эти способы находят применение при изготовлении деталей с повышенными требованиями к механической прочности и химической устойчивости соединений. К таким, в частности, относятся кюветы из стекла, заполняемые растворами (органические, щелочные, кислотные), которые исключают возможность соединения склеиванием, а метод ГОК трудоемок. Соединение таких деталей может быть выполнено:

- сваркой лазерным излучением, которое фокусируют в плоскость шва, содержащего светопоглощающую прослойку (пленку, припой), пучек перемещают по периметру шва и он расплавляет припой;
- сваркой в пламени кислородно-водородной горелки обеспечивающей температуру нагрева 2000°С что вызывает деформацию соединяемых элементов и кристаллизацию поверхностного расплавленного слоя;
- спеканием при низкотемпературном нагреве с помощью легкоплавкого припоя и при высокотемпературном нагреве в вакуумной печи (диффузионная сварка), вакуум позволяет

удалить адсорбированные газы, способствует активной поверхностной диффузии в плоскости соединения.