

## 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 подготавливают 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, выглаживается по микронеровностям шлифованной поверхности.

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

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.

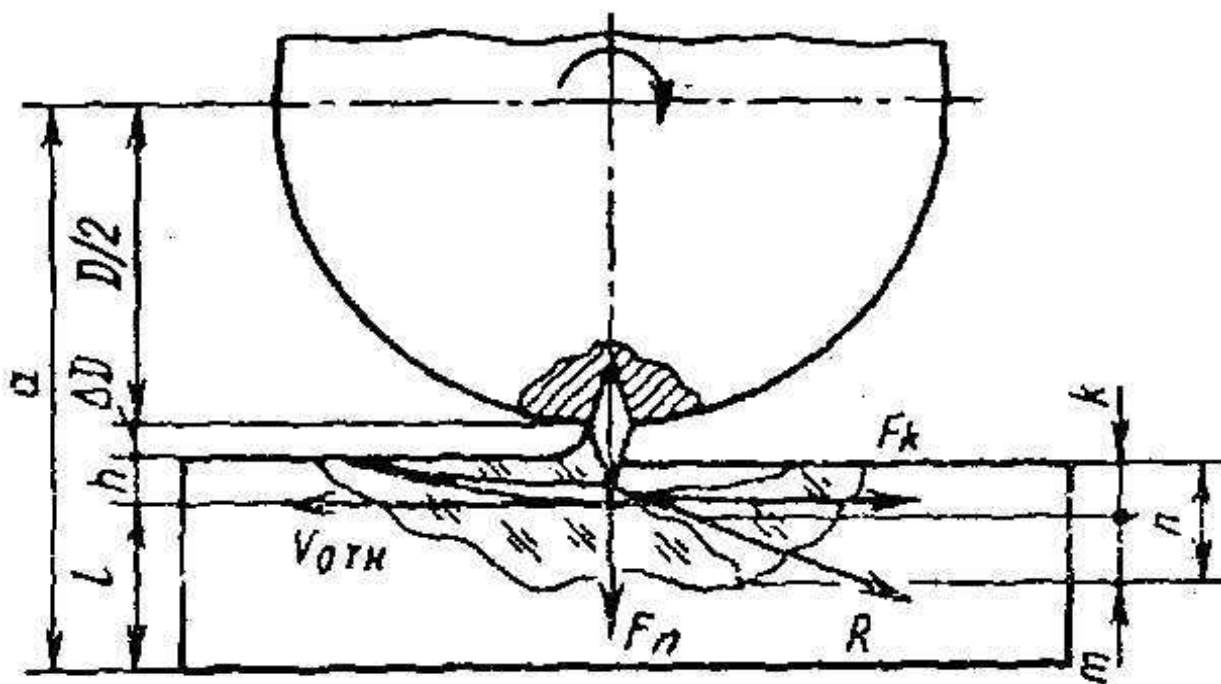


Рис.13.1 Схема работы закреплённого абразивного зерна

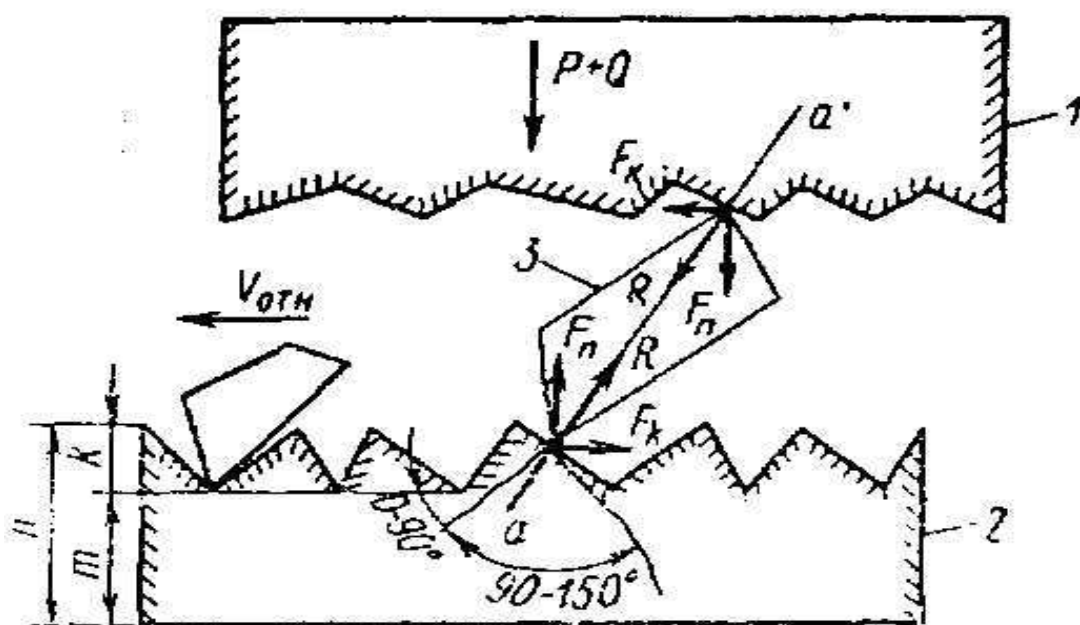


Рис.13.2 Схема работы свободного абразивного зерна