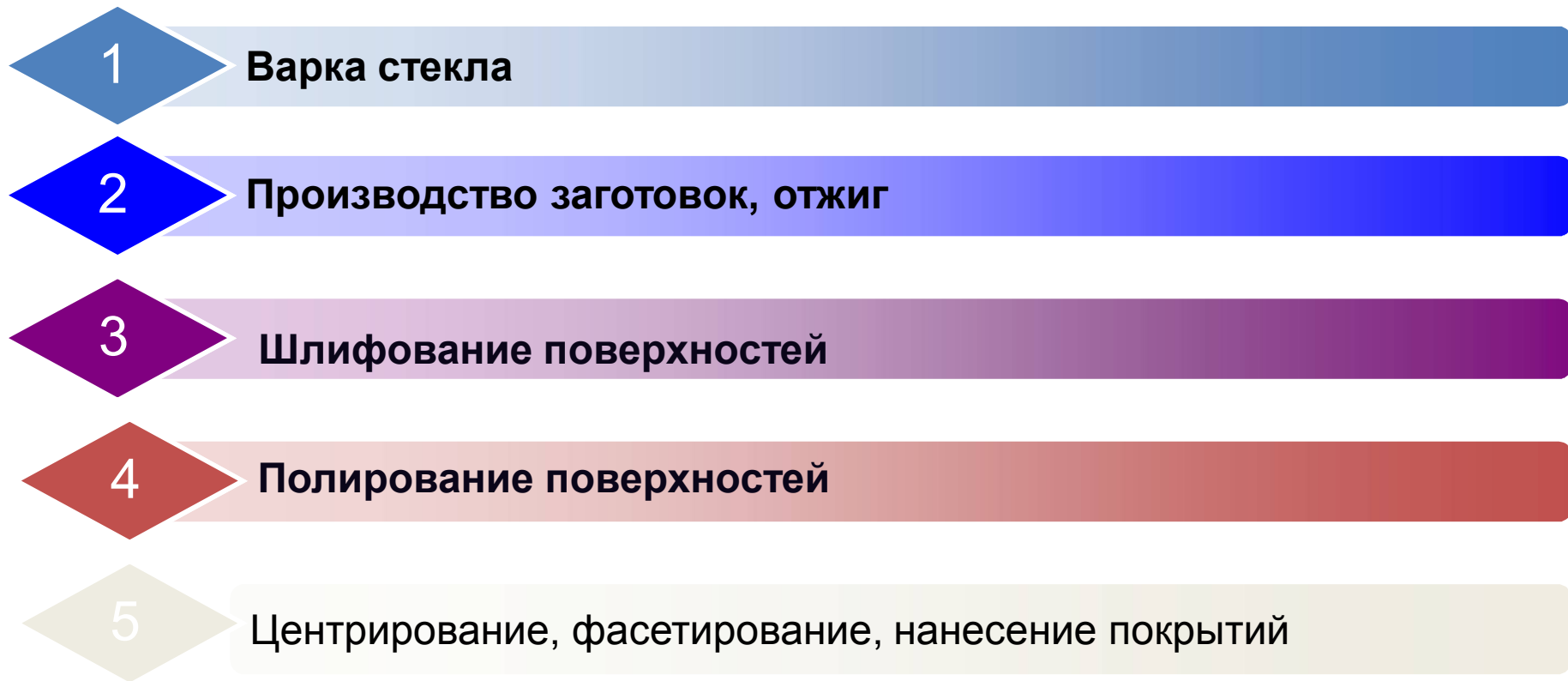


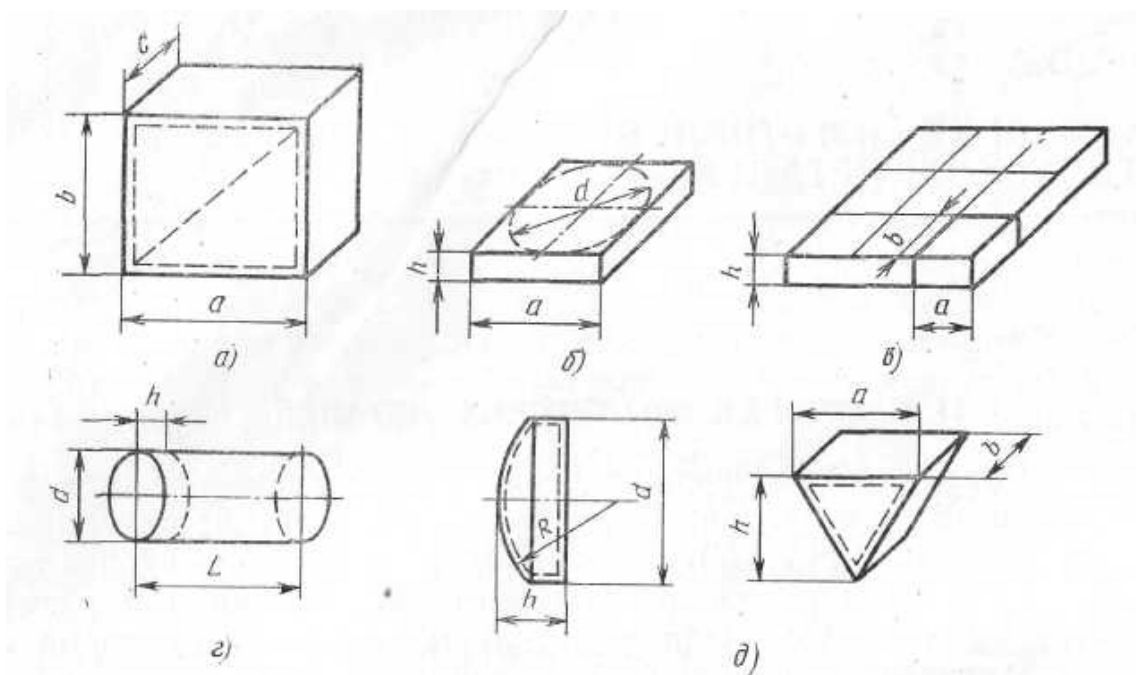
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ



- ПРОИЗВОДСТВО ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ.
- Виды и технологические этапы производства заготовок.
- Способы промышленной разделки стекла; термическая обработка.

Заготовки оптических деталей из оптического стекла

получают в виде прямоугольных или круглых пластин, плиток, штабиков и прессовок. На обработку заготовки поступают партиями, состоящими из заготовок одного наименования и размера. К партии прикладывают сопроводительный паспорт, в котором указывают фактические значения оптических характеристик стекла, показатели качества, номера варок и отжига.



- а - прямоугольная пластина;
- б - плитка для круглых деталей;
- в - плитка с размерами, кратными размерам единичной заготовки;
- г - штабик с круглым сечением;
- д - прессовки линзы и призмы

ЗАГОТОВКА (прессовка линзы)

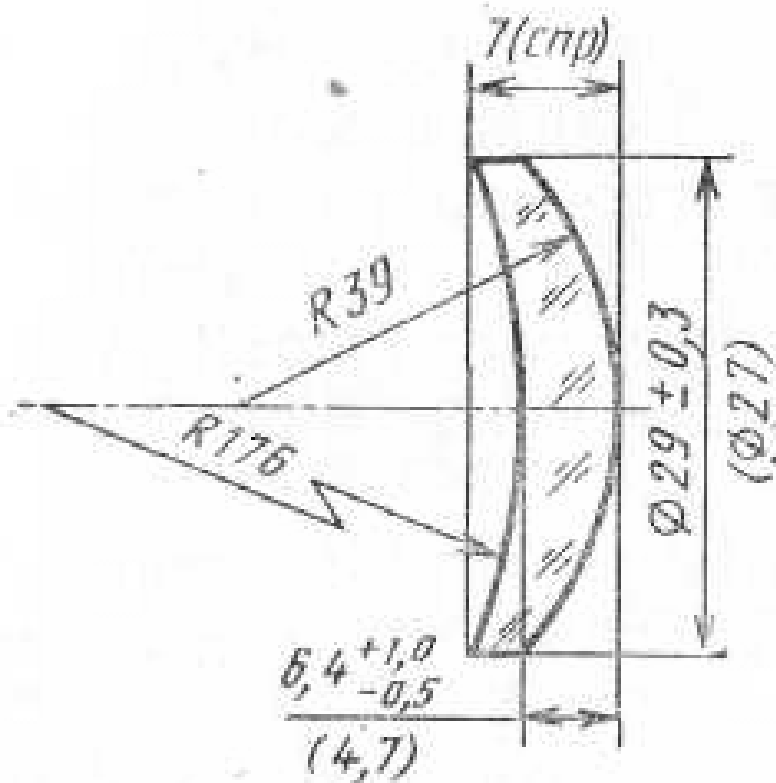


Наиболее рациональной заготовкой деталей типа линз и призм является прессовка (рис.1,д), повторяющая конфигурацию готовой детали. Для изготовления прессовок необходима технологическая оснастка: прессформа, шаблоны и др. Стоимость оснастки окупается только при прессовании определенного числа заготовок. Поэтому ГОСТ 13240-78 «Заготовки оптического стекла» установлен минимальный объем партии заготовок, поставляемых в виде прессовок.

Масса заготовки, г	Объем при заказе, шт.
1,5 - 10	2000
10 - 15	1000
50 - 100	250
100 - 250	150
250 – 500	100

- Технические условия (ТУ) на заготовку составляют на основе чертежа оптической детали. В ТУ приводится эскиз заготовки с необходимыми для изготовления и контроля размерами и допусками, указывается марка стекла, технические требования к стеклу и заготовке, масса и число заказываемых заготовок в штуках (рис. 2).
- На эскизе рядом с размерами заготовки в скобках проставляют как справочные соответствующие размеры готовой детали. Для деталей с размерами более 150 мм на заготовке указывают также световой диаметр или расположение рабочей зоны. Вне рабочей зоны дефекты типа одиночных пузырей и узловых свилей не нормируются.

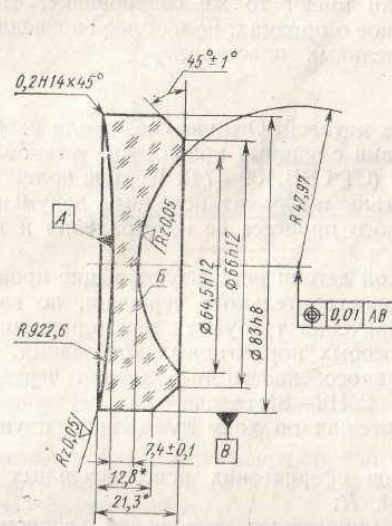
- Маршрутную технологию (МТ) изготовления заготовки технолог разрабатывает с учетом
 - требований к стеклу,
 - размерам партии и
 - габаритным размерам детали.
- Выбирается метод и последовательность операций на основе типовых технологических процессов.
- Номер маршрутной технологии указывают в ТУ на заготовку.



Общие ТУ по ГОСТ 13240-78
 Марка стекла ТК 16 ГОСТ 3514-76

Катег. и класс Δn_e	4B
Катег. и класс $\Delta(n_e' - n_e')$	3Г
Однородность	3
Дв. лучепреломл.	3
на	4
Бесшумность	2Б
Пузырность	5Д
Штук	10 000
МТ	218-82
КЗ	2,76
Масса, г	
макс.	14,60
ном.	12,50
мин.	11,51

Образец оформления технических условий на заготовку линзы

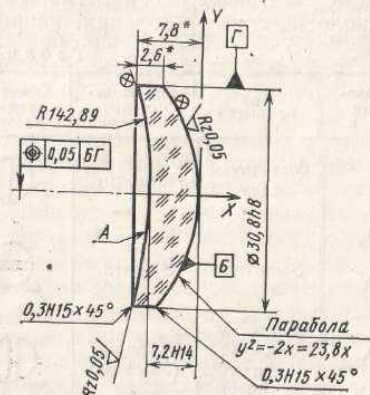


1.* Размеры для справок

Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	3Б
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	2
Бесвильность	1Б
Пузырность	3А
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
P_A	V
P_B	VI
$\Delta R_{A,B}$	2
f'	-74,22
S_F	78,55
$S_{F'}$	-74,45 ± 2,23
$O_{\Phi A}$	76
$O_{\Phi B}$	61



1.* Размеры для справок

2. ⊗_{AB} - просветл. 44Р.43Р. $\lambda = 520 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$

Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	-
Однородность	3
Двойное лучепрелом.	3
M_A	3
Бесвильность	2Б
Пузырность	2Б
N_A	5
ΔN_A	0,5
P_A	IV
P_B	V
ΔR_A	2
f'	47,87
S_F	-42,62
$S_{F'}$	48,71 ± 0,81
$O_{\Phi A}$	26,1
$O_{\Phi B}$	28,1

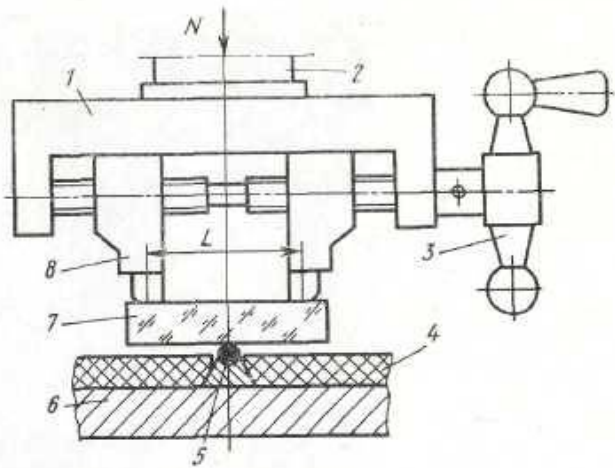
- Коэффициент запуска (КЗ), равен отношению массы сырьевого стекла, необходимого для изготовления заготовки, к теоретической массе заготовки,
- КЗ устанавливают на основе имеющихся нормативов и выбранной МТ.
- Коэффициент запуска зависит от требований к показателям качества стекла.
- Например, для заготовок линз фотооптики диаметром 20-50 мм значение КЗ находится в пределах 2-3.

- Размеры заготовки рассчитывают с учетом необходимого припуска на обработку и предельных отклонений размеров.
- Значение припуска зависит от выбранной технологии, метода базирования детали при обработке и толщины дефектного слоя поверхности заготовки.
- Существуют оговоренные стандартом ограничения размеров заготовок.
- Для заготовок-прессовок размером до 150 мм толщина заготовок не должна быть менее 3 мм для линз и 4 мм для плоских деталей,
- отношение диаметра или диагонали заготовки к ее толщине должно быть в пределах от 15 : 1 до 1,25 : 1.

- Процессы изготовления заготовок ОД можно разделить на две группы:
 1. холодная разделка
 2. горячее формование.

- При холодной разделке сырьевое стекло: стеклоблоки, плитку - после визуального осмотра и разметки раскалывают или распиливают алмазным инструментом.
- В первую очередь из стеклоблока выбирают крупногабаритные заготовки с высокими требованиями по бессвильности и пузырности; оставшееся стекло используют для менее ответственных и более мелких по габаритным размерам заготовок.

ХОЛОДНАЯ РАЗДЕЛКА СТЕКЛА



Разделка стекла раскалыванием.

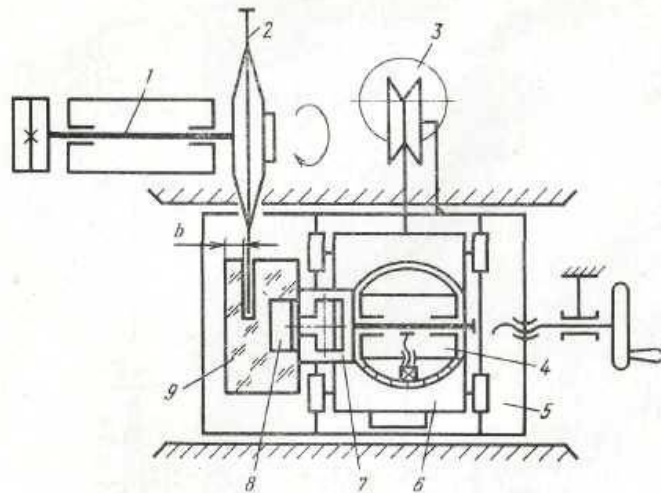
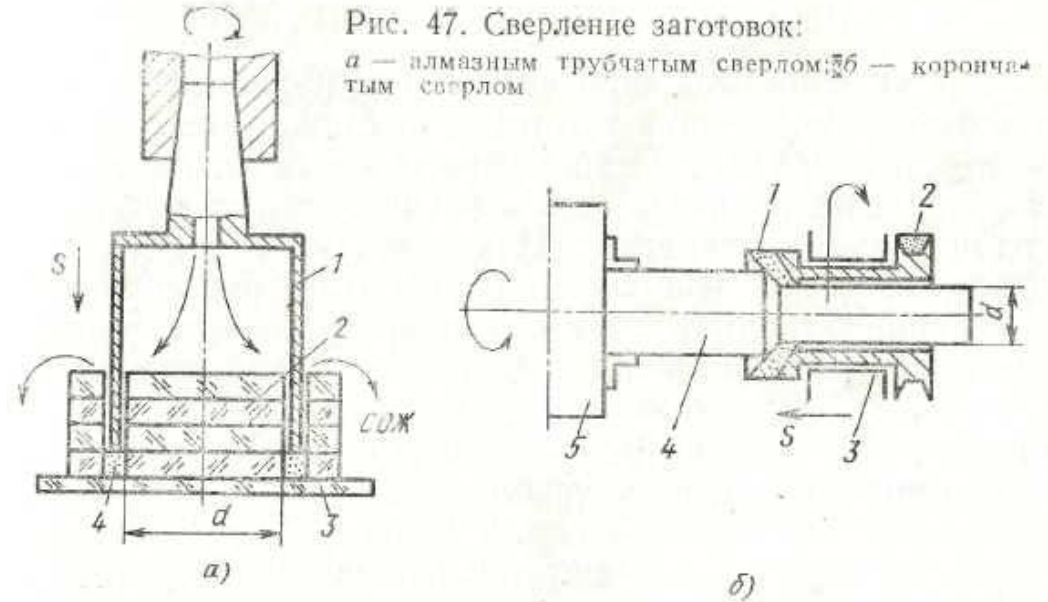


Схема станка для распиливания
стекла отрезным алмазным кругом





Участок заготовки.

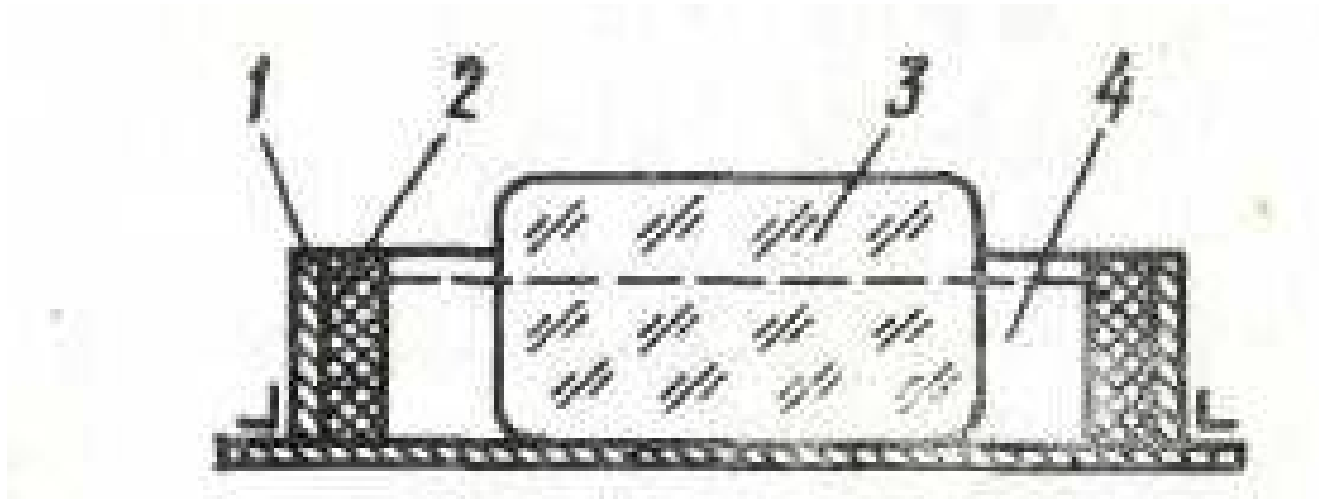
Здесь проходит первая стадия выполнения заказа – заготовка полуфабрикатов для дальнейшей обработки на полировальном участке.



- Горячее формование заготовок осуществляют в формах из кусочков стекла, разогретых до температуры пластической деформации, или жидкой стекломассы, вырабатываемой из стекловаренной печи.

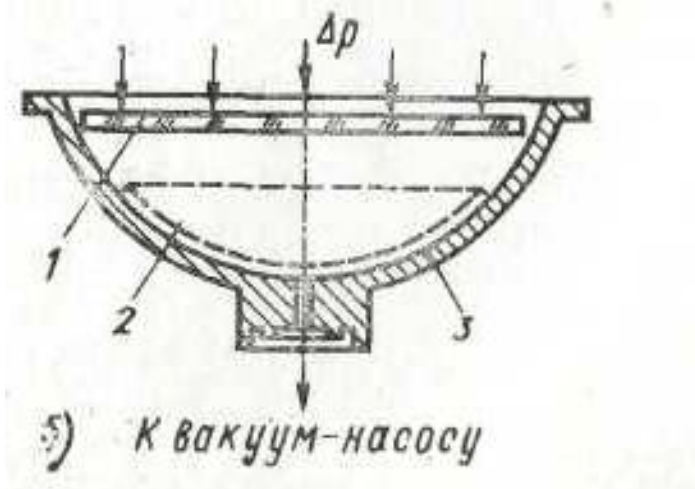
- **ГОРЯЧЕЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ЗАГОТОВОК**
 - 1. Свободное моллирование**
 - 2. Принудительное вакуумное моллирование**
 - 3. Прессование из нарезок**
 - 4. Изготовление из стеклянных прутков-штабиков**
 - 5. Прессование заготовок из непрерывно вытягиваемого штабика**
 - 6. Прессование из жидкой стекломассы**

- Многообразие методов горячего формообразования объясняется необходимостью в каждом конкретном случае изготовления заготовки учитывать физико-химические свойства используемого стекла, требования к показателям качества, размеры и число заготовок в партии. На основе анализа этих сведений выбирают оптимальный и наиболее экономически целесообразный процесс.



- **Свободное моллирование.**
- Это наиболее простой метод горячего формообразования заготовок из стекла. Бесформенный кусок 3 стекла, по массе равный массе заготовки 4, укладывают в футерованную керамикой 2 металлическую форму 1 и нагревают в печи до температуры, соответствующей вязкости стекла 10^7 Па*с. Стекло под действием силы тяжести растекается и заполняет внутреннюю полость формы.

- **Температурный режим свободного** моллирования включает разогрев стекла до температуры моллирования, выдержку при этой температуре, отжиг и охлаждение. Заготовки получают в виде круглых дисков или прямоугольных пластин.
- Моллирование осуществляют в электрических камерных печах периодического действия или в туннельных печах, где формы со стеклом передвигаются механическим толкателем по каналу печи, переходя **из одной температурной зоны в другую.**

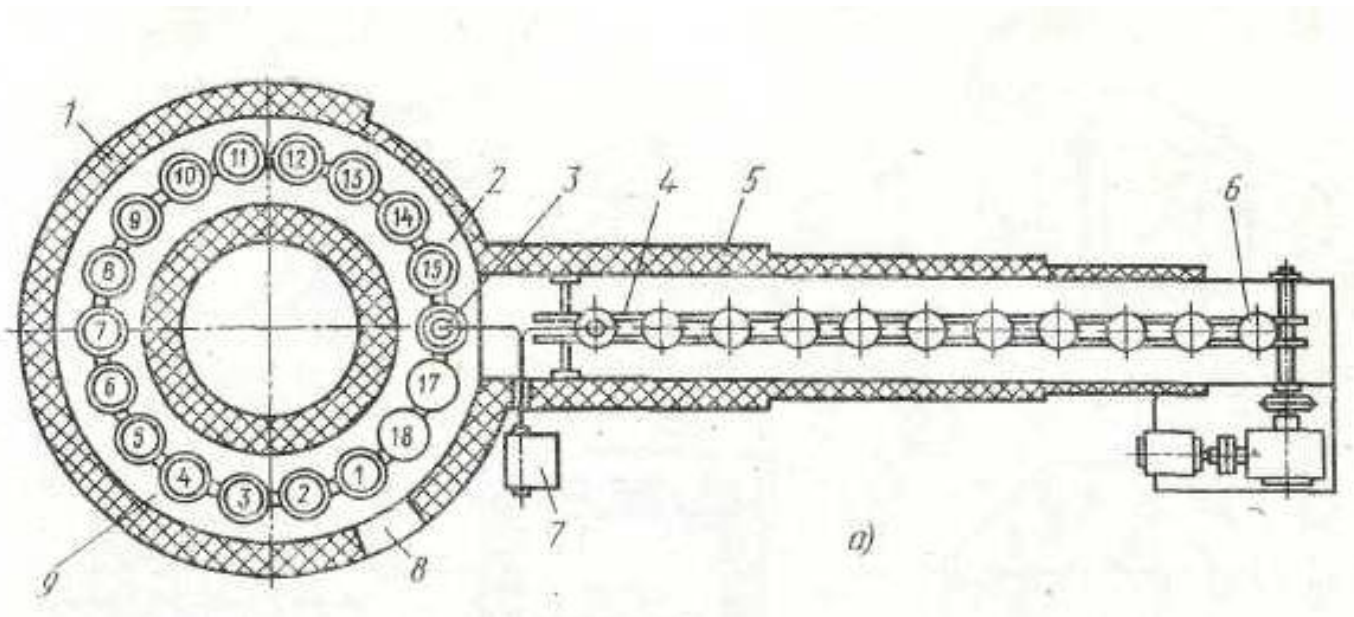


ПРИНУДИТЕЛЬНОЕ ВАКУУМНОЕ МОЛИРОВАНИЕ

- Формование плоской заготовки 1 в форме 3 происходит под действием избыточного давления, создаваемого при откачке воздуха вакуумным насосом из полости между заготовкой и формой,

- Принудительное моллирование осуществляют при вязкости стекла 10^8 — 10^9 Па*с. При такой вязкости микронеровности формы на горячей поверхности стекла не отпечатываются — заготовка как балка своей поверхностью ложится на опоры — вершины микронеровностей.
- Если взять плоскую заготовку с полированной поверхностью, то после принудительного моллирования полированная поверхность на заготовке сохраняется, и механической обработки поверхностей деталей не требуется.
- Принудительным моллированием изготавливают заготовки диаметром 40—500 мм и толщиной 2—20 мм оптических деталей типа: зеркал осветительных светособирающих устройств приборов, обтекателей, иллюминаторов.

- Моллирование осуществляют
- в электрических камерных печах периодического действия
- или на полуавтоматических установках непрерывного действия.

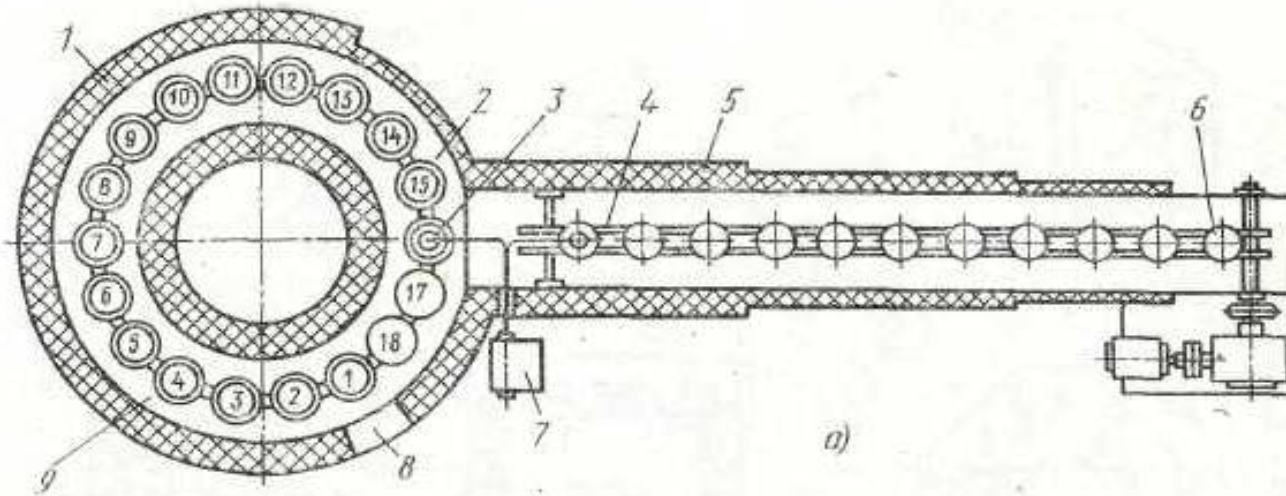


Полуавтоматическая установка для моллирования.

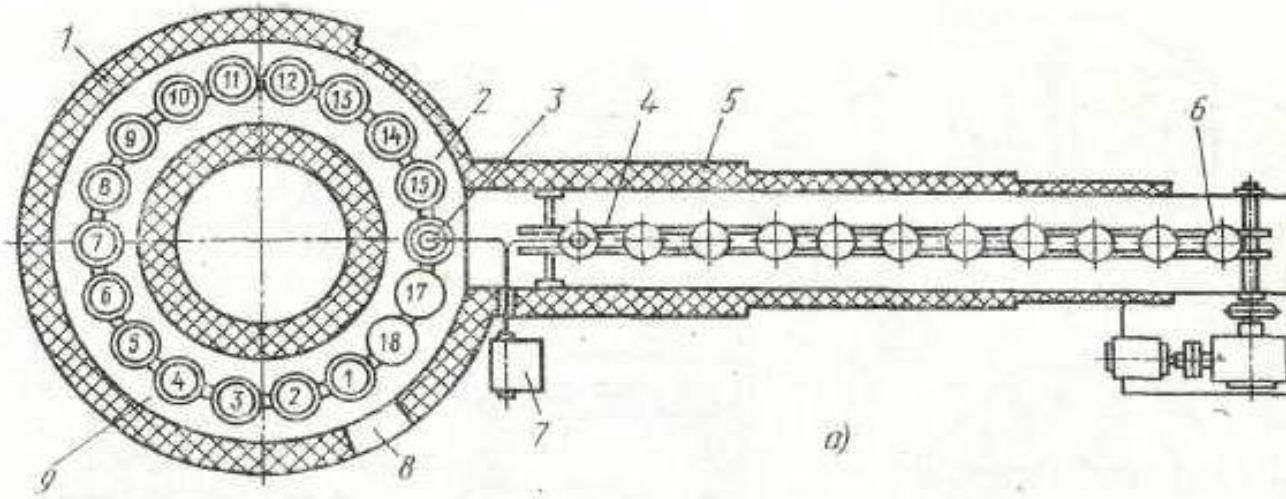
1 – печь, соединенная с горячей камерой 2, с печью отжига и охлаждения заготовок.

Формы 9 для моллирования, устанавливаются на карусель, которая поворачивается за каждый цикл на $1/18$ часть оборота.

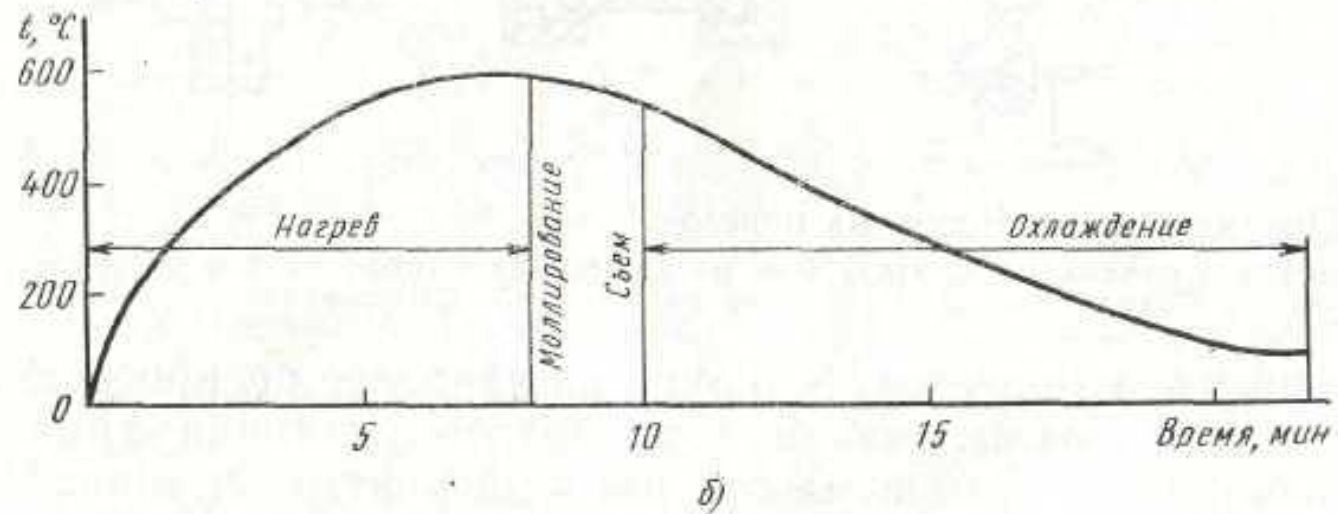
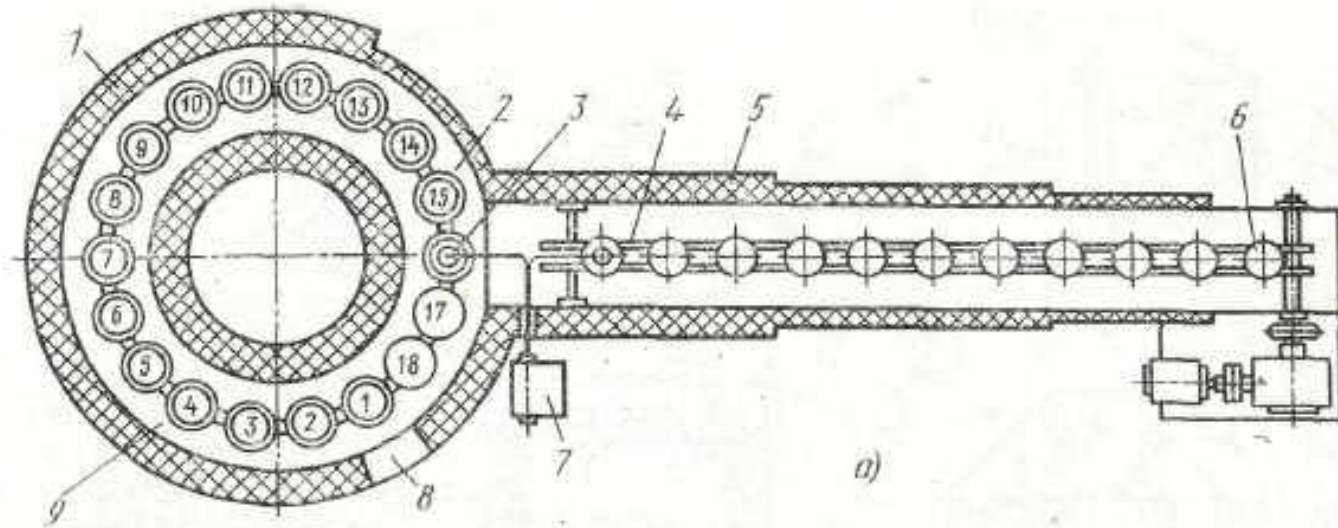
8 - згрузочное окно.



- Перемещаясь внутри канала печи с позиции 2 на позицию 11, стекло нагревается до температуры моллирования.
- В положении, 12 и 13, к шпинделям, на которых установлены формы, подключается вакуумный насос, происходит откачка воздуха из полости формы и формование разогретого стекла.



- Изделия на позициях *14* и *15* охлаждаются до температуры, исключающей деформацию их поверхности при съеме из формы.
- На позиции *16* перестановщик *3*, работающий от гидравлического привода *7*, вынимает заготовку из формы и укладывает ее на движущийся транспортер *4* печи отжига, где она охлаждается.
- В конце печи оператор снимает с транспортера изделия *6* и выполняет их контроль.



Полуавтоматическая установка принудительного моллирования заготовок:
 (а — схема установки; б — температурный режим ведения процесса)

- В отличие от свободного молирования принудительное молирование осуществляется под действием вакуума создаваемого при откачке насосом воздуха из-под находящейся формы плоской заготовки.
- Если процесс проходит при температуре соответствующей началу пластичной деформации стекла, то микронеровности формы не отпечатываются на молировании поверхности заготовки.
- 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.

Прессование заготовок.

- Прессование проводят в закрытой металлической форме для деталей массой до 0,5 кг из предварительно приготовленных нарезок оптических деталей.
- Для прессования нарезки предварительно разогревают в электрических или газовых печах до температуры размягчения соответствующей вязкости стекла от 10^4 до 10^6 Па·с.
- Разогретая порция стекла переносится из печи в нагретую до $T = 400 \div 600^\circ\text{C}$ пресс-форму гидравлического или пневматического пресса.

- Отпрессованную заготовку вынимают из пресса и охлаждают, а затем перемещают в печь 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 устройства ванной печи.
- Прессование осуществляется на многопозиционных роторных прессах из штабиков.
- *Штабик* – это стеклянный пруток круглого сечения с полированной поверхностью.

- Тонкий отжиг — последняя операция технологического процесса изготовления заготовок оптических деталей.
- Цель его — снизить до минимально допустимых значений остаточные термические напряжения в стекле, т. е. ликвидировать физические неоднородности и получить заготовки с одинаковыми для данной партии значениями показателей преломления и дисперсии.

- Тонкий отжиг в электрических камерных печах.
- Такая печь имеет высокую теплоизолирующую крышку и систему нагревателей, обеспечивающих равномерный нагрев и принудительное снижение температуры.
- Управление процессом нагрева и охлаждения заготовки производится автоматически по температурному графику.

Температурный график подразделён:

- 1)нагрев;
- 2)выдержка;
- 3)ответственное охлаждение;
- 4)остывание.

- В процессе тонкого отжига заготовки сначала нагревают до верхней температуры отжига с большой скоростью, затем дают выдержку при постоянной температуре. Во время выдержки происходит 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.
- Изменяя скорость охлаждения можно изменить значения коэффициента преломления и дисперсии заготовок.

- КОНТРОЛЬ ЗАГОТОВОК ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ
- Заготовки оптических деталей подвергают контролю по геометрическим размерам, дефектам поверхности и показателям качества стекла.
- Контроль геометрических размеров в крупносерийном производстве заготовок осуществляется выборочно в объеме 1-5 % партии, но не менее 10 шт. С помощью универсальных измерительных инструментов и шаблонов проверяют линейные и угловые размеры, толщину, фаски, отклонение от плоскостности и просвет в середине сферической поверхности на соответствие требованиям ТУ и ГОСТ 13240—78.

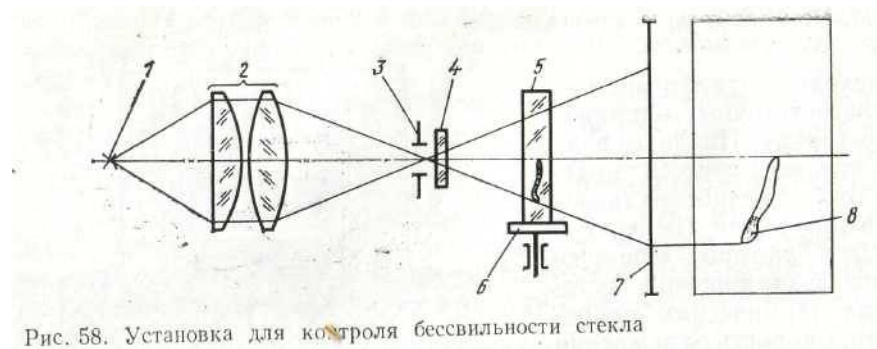


Рис. 58. Установка для контроля бесвильности стекла

Шлифование и полирование оптических поверхностей

Служебное назначение оптических деталей — пропускать, отражать световые пучки, изменять их спектральный состав, направление, сходимостъ или свойства.

Виды поверхностей.

- Оптические детали ограничены поверхностями трех видов:
 1. исполнительными,
 2. вспомогательными,
 3. свободными.

- Исполнительные поверхности предназначены для выполнения деталию своего служебного назначения. Это полированные сферические, плоские и несферические поверхности.
- Полированные поверхности оптических деталей имеют отклонение от заданных геометрически по стрелке кривизны меньше 2,5 мкм и по форме меньше 0,5 мкм. Параметр шероховатости Rz (ГОСТ 2789-73) исполнительных поверхностей находится в пределах 0,1-0,05 мкм. При указанной шероховатости на исполнительных поверхностях могут быть дефекты чистоты, допустимое число и размеры которых ограничиваются ГОСТ 11141—76.

- Вспомогательные поверхности оптических деталей служат для присоединения к ним оправ, крепежных деталей, упоров и установочных плат. Это шлифованные цилиндрические или плоские поверхности, которые называют также установочными или вспомогательными сборочными.
- Например, это цилиндрические поверхности линз, боковые грани призм, торцевые грани пластин. На вспомогательных поверхностях оптических деталей монтируют, собирают, устанавливают неоптические детали приборов, выполненные обычно из металлов или пластмасс.

- Свободные поверхности оптических деталей служат для выполнения законченных конструктивных и технологических форм. Они не соприкасаются с поверхностями других деталей. Свободные поверхности - это шлифованные, главным образом плоские, конические или сферические поверхности.
- Свободные поверхности предохраняют детали от заколов (фаски) или ограничивают форму и размеры деталей после снятия материала, избыточного для выполнения ее основного назначения.

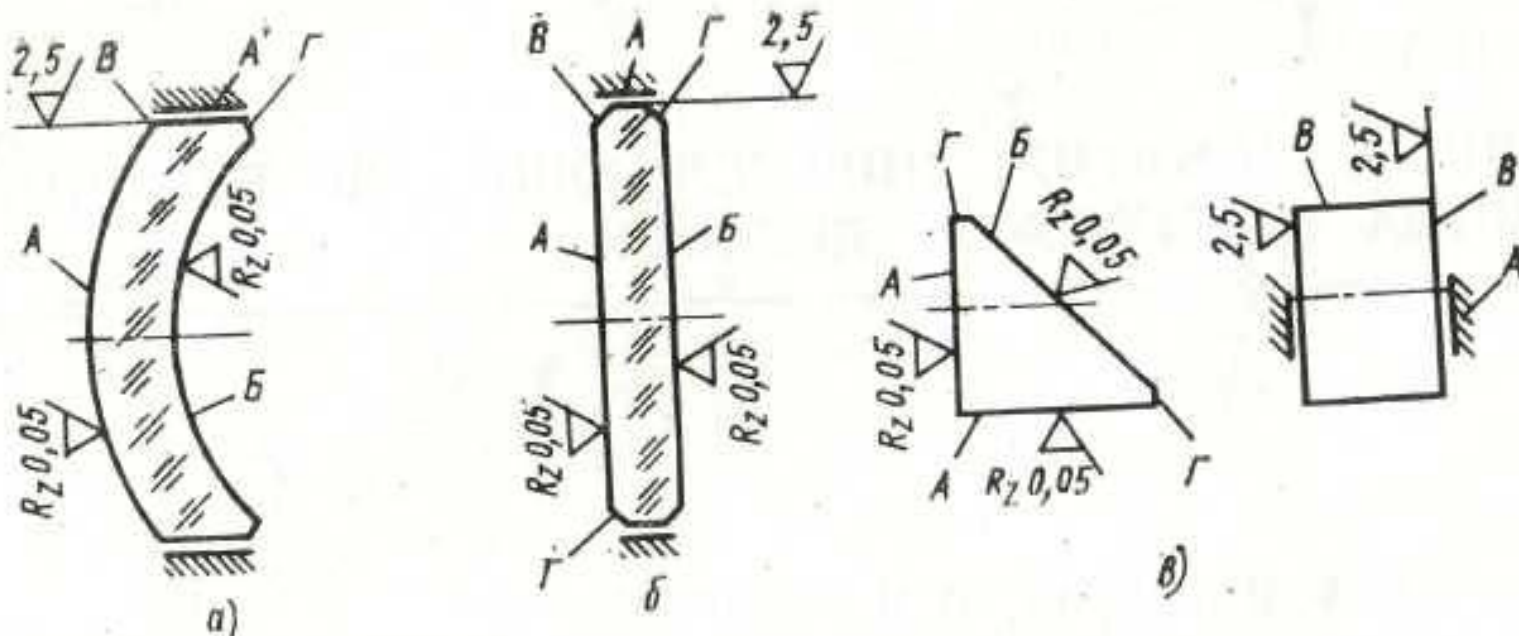


Рис. 61. Виды поверхностей:
a — у линзы; *б* — у пластинки; *в* — у призмы $AP = 90^\circ$

Исполнительные поверхности оптических деталей **A**, **B**, вспомогательные **B**, свободные **Г**.

Исполнительные поверхности оправ, обозначенные **A'**, служат для сопряжения со вспомогательными поверхностями **B** оптической детали.



Участок шлифовки и полировки.

После участка заготовки будущие оптические детали шлифуются, полируются.





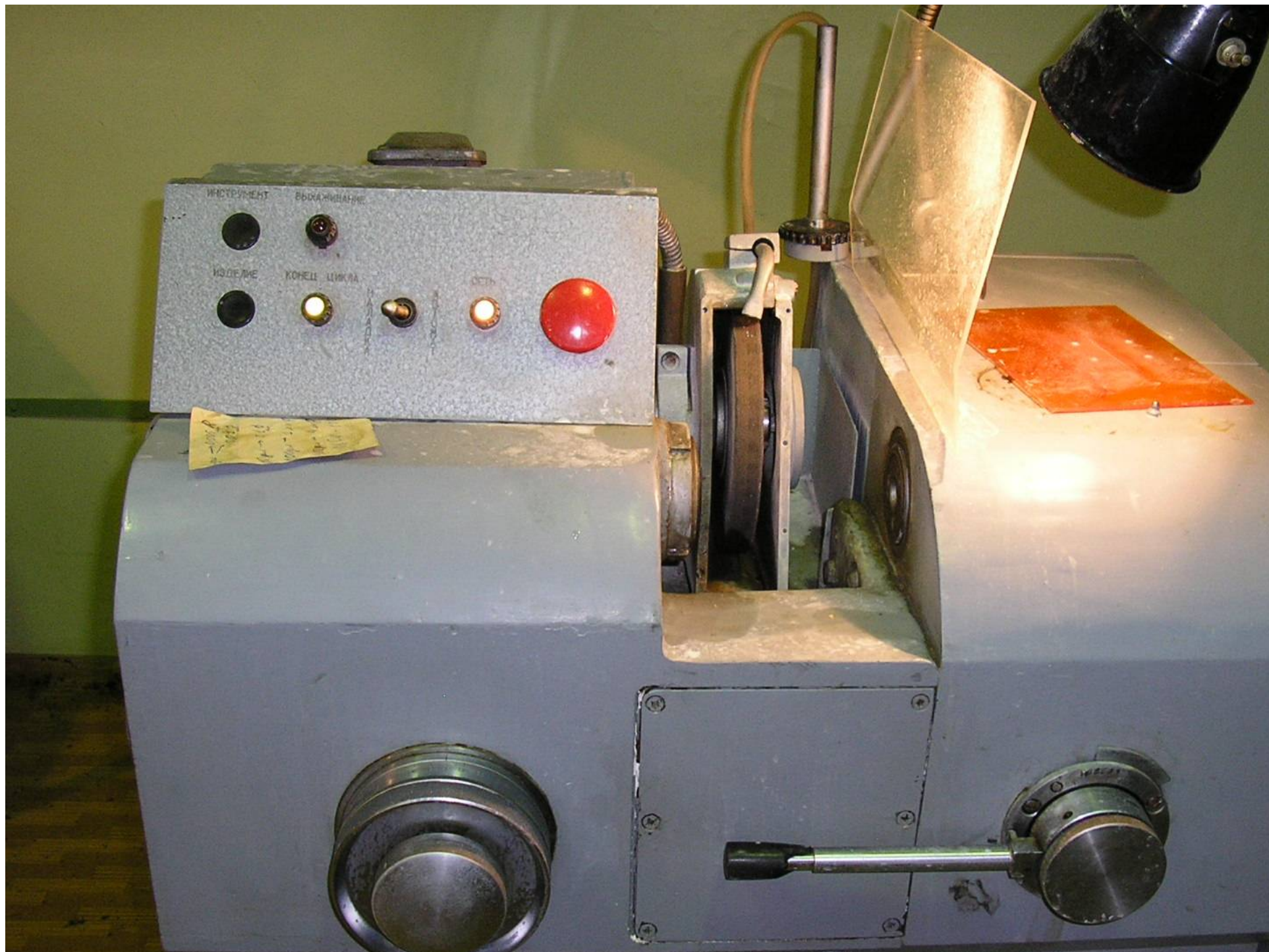
Процессы обработки оптических поверхностей:

1) шлифование:

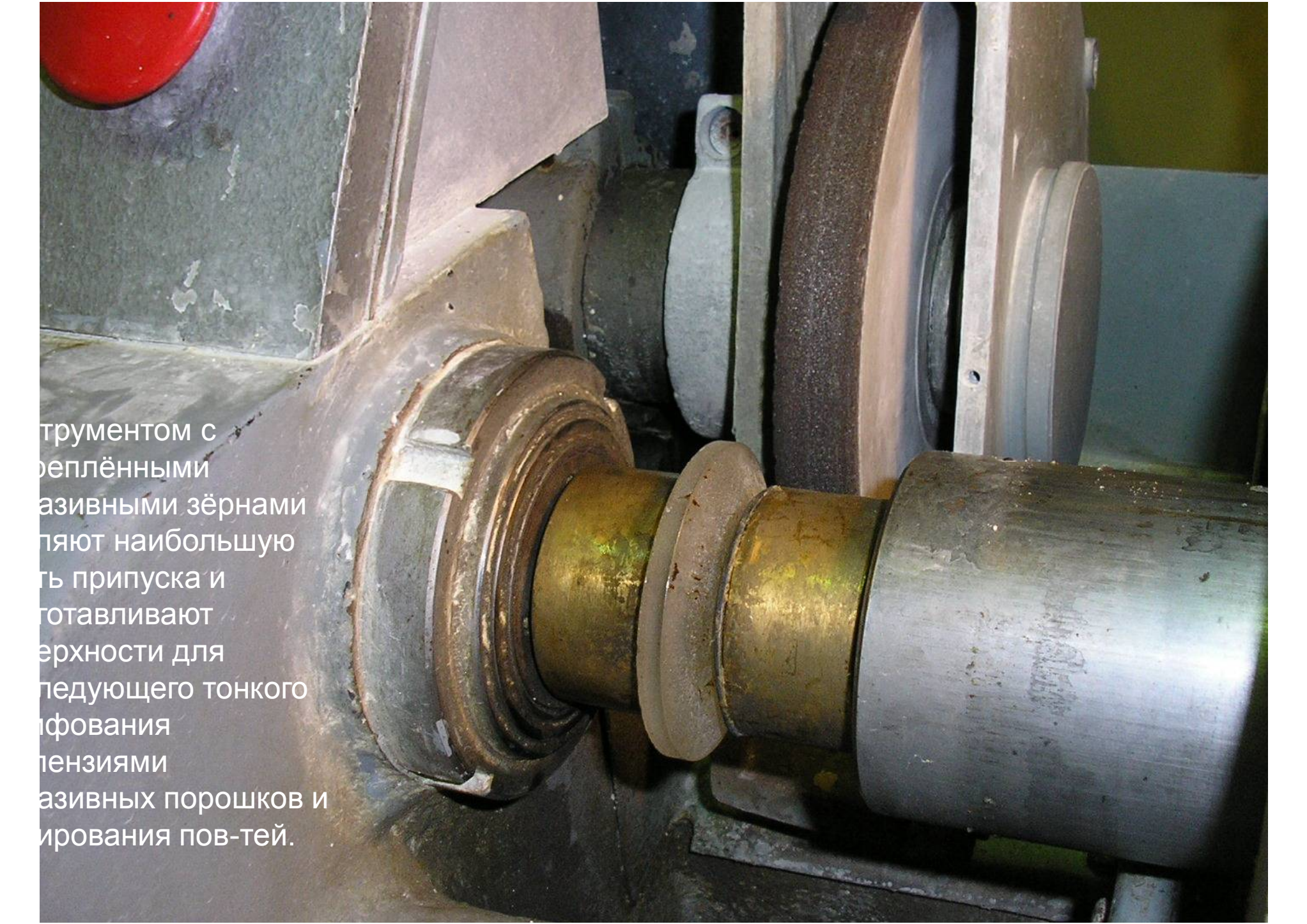
- а) закреплёнными абразивными зёрнами;
- б) суспензиями абразивных порошков.

2) полирование.

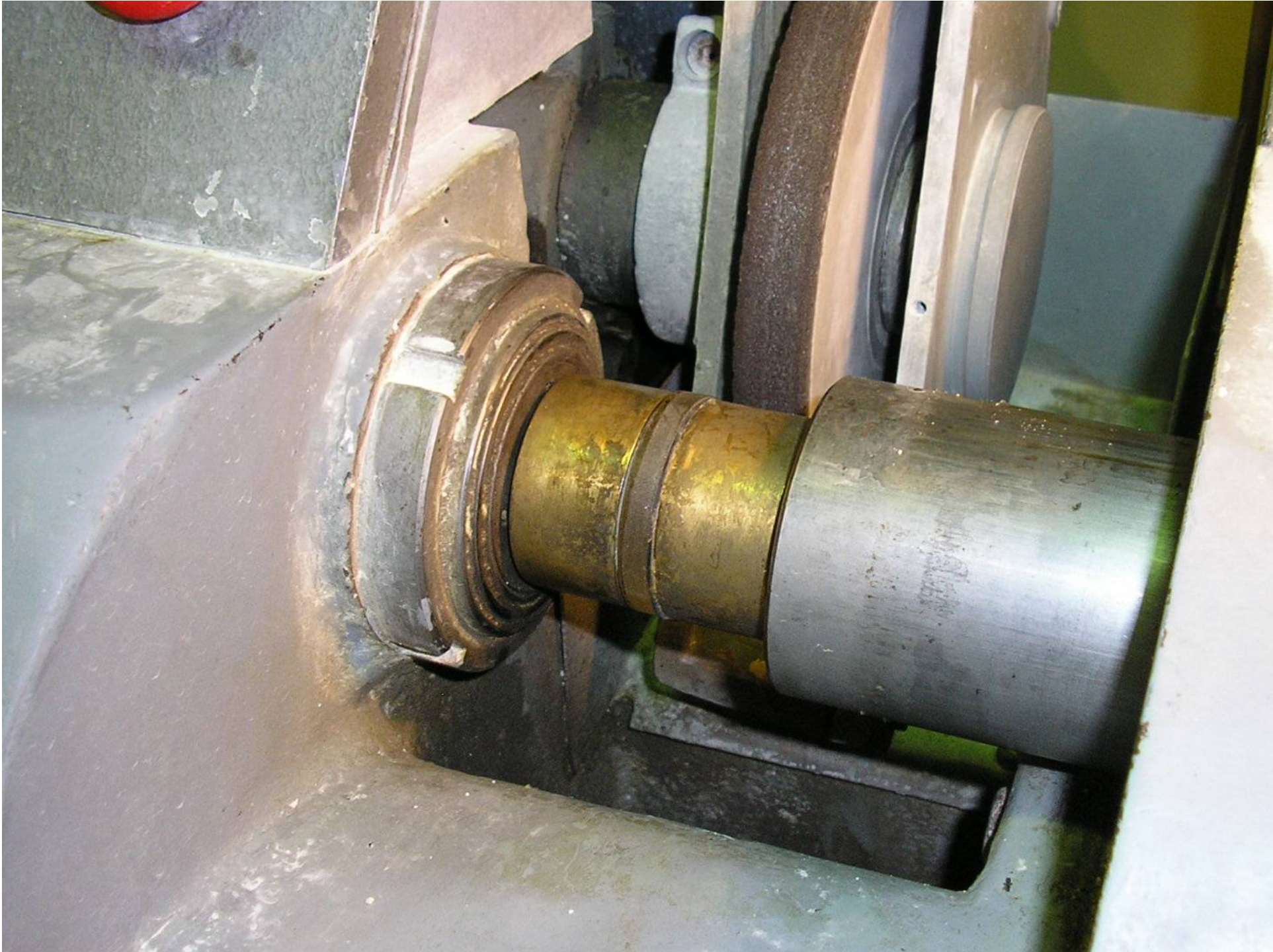
- **Обработка закрепленными абразивными зернами** в оптической технологии — это наиболее эффективный процесс обработки стекла.
- Его эффективность особенно увеличивается с применением природных и синтетических алмазов в инструментах на металлических связках, изготовленных методами порошковой металлургии.
- Процесс шлифования закрепленными абразивными зернами применяют **для обработки вспомогательных поверхностей** с шероховатостью до 2,5 мкм и **для тонкого шлифования исполнительных поверхностей**.

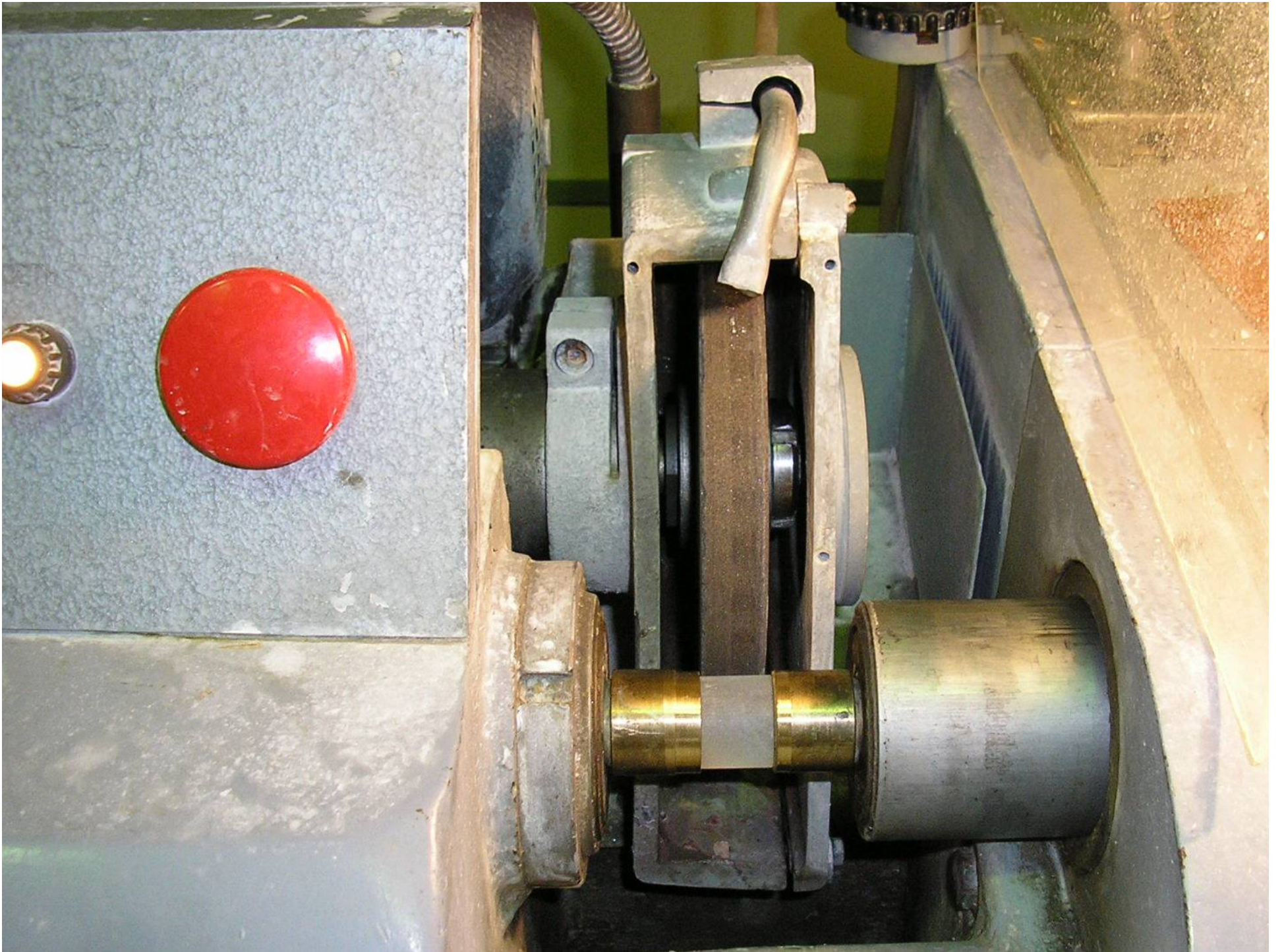






инструментом с
сцеплёнными
абразивными зёрнами
удаляют наибольшую
толщину припуска и
подготавливают
поверхности для
последующего тонкого
шлифования
пленками
абразивных порошков и
полирования пов-тей.





Шлифование суспензиями абразивных порошков

- Обработка САП **подготавливает** исполнительные поверхности **к последующему полированию** с заданными значениями N , ΔN , P (допуски на оптические поверхности по кривизне, форме, классам чистоты).
- **Шлифующая суспензия** представляет собой **взвесь порошка абразивных зёрен и жидкости**.
- Разрушение стекла происходит под действием абразивных зёрен передающих вибрационно-ударным действием кинематическую энергию инструмента на обрабатываемую поверхность стекла. Стекло разрушается абразивными зёрнами и взамен исходной поверхности образуется поверхность с более совершенными качествами.

готовки устанавливаются по настроечной базе. Положение фиксируют приклеиванием к приспособлению слоем (0,05d_{заг}+1,0 мм) смолы (эластичный от блокирования).











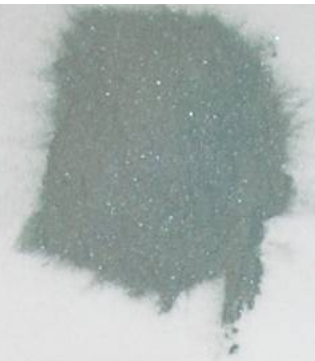
Применяются порошки зёрна которых по сравнению со стеклом имеют большую твёрдость:

1. карбид кремния;
2. электрокорундовые;
3. кварцевые;
4. алмазные.

- Эти материалы 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.



M60



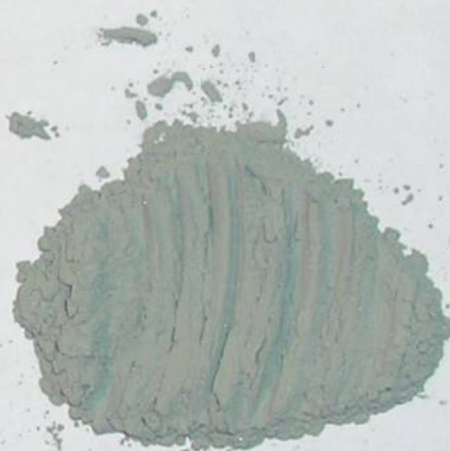
M40



M28



Полирит



M14



M60



M40





- **Процесс полирования стекла.** Полирование необходимо для придания исполнительным поверхностям полной прозрачности для прохождения света и обеспечения заданных значений N , ΔN , P . Процесс полирования стекла водными суспензиями полирующих порошков имеет более сложную, чем шлифование, физико-химическую природу.
- Шероховатость полированной поверхности установлена ГОСТ 2789-73 как $Rz = 0,05-0,1$ мкм.
- Наружный рельефный слой, образованный шлифованием, удаляется полированием полностью, а трещиноватый частично остается, но трещины на поверхности заполняются частицами гидролизованного стекла и не мешают прохождению света.













- Полирующие порошки состоят из окислов металлов: железа, церия, лантана с размерами зерен **0,2-5 мкм**; порошки взвешены в воде и находятся между притирающимися поверхностями полировальника и стекла.
- **Зерна полирующих порошков по сравнению со шлифующими зернами имеют меньшую твердость и менее резко выраженные абразивные свойства самозатачивания при раскалывании.**
- Полирование выполняют на тех же станках, что и шлифование, но при меньшей частоте вращения рабочих инструментов. Шлифование длится минуты, а полирование – часы, т. е. время приблизительно в 20 раз большее времени шлифования.

- Абразивные материалы - порошкообразные твердые кристаллические вещества, зерна которых при раскалывании образуют острые режущие грани, способные самозатачиваться при изнашивании.
- Абразивные свойства материала оценивают коэффициентом шлифующей способности (отношение массы стекла, сошлифованного в стандартных условиях данным абразивом, к массе стекла, сошлифованного природным алмазом).

- В оптическом производстве используются как природные абразивные материалы: алмаз, кварцевый песок, корунд, так и искусственные: синтетический алмаз, электрокорунд, карбид бора.
- Применение природных материалов в настоящее время значительно сократилось, так как искусственные материалы имеют более высокую шлифующую способность, более однородны по свойствам и содержат меньше примесей.

Основные физико-механические свойства абразивных материалов, используемых в технологических процессах обработки оптических деталей, приведены в таблице.

Наименование материала	Твердость		ρ , г/см ³	Относительная шлифуемая способность
	по минералогической шкале	микротвердость, Н·10 ¹⁰ , Па		
Алмаз природный	10	10	3,01—3,56	1,0
Алмаз синтетический	10	8,6—10	3,48—3,54	0,7—1,0
Карбид бора	9,8—9,9	3,7—4,5	2,48—2,52	0,5—0,6
Карбид кремния	9,5—9,7	2,8—3,5	3,16—3,99	0,25—0,45
Электрокорунд	9—9,2	1,8—2,4	3,93—4,01	0,15—0,25
Песок кварцевый	7	1—1,1	2,6—2,65	0,02—0,03

- Природный алмаз самый твердый из известных материалов, является одной из кристаллических модификаций чистого углерода и при нагревании до температуры 800 °С в присутствии кислорода сгорает.
- Принято выражать массу алмаза в каратах. Один карат равен 0,2 г.
- Природный алмаз в виде порошков с размерами зерен 10-600 мкм применяют для изготовления шлифовальных кругов, пил и сверл.

- Зерна алмаза имеют резко выраженные абразивные свойства, инструмент с естественным алмазом отличается высокой производительностью и стойкостью в работе при обработке хрупких оптических материалов.
- Применение природного алмаза ввиду его высокой стоимости и дефицитности ограничено. Только освоение промышленной технологии синтеза искусственных алмазов позволило, начиная с 60-х годов, обеспечить оптическую промышленность в достаточном количестве алмазным порошком.

- *Синтетический алмаз* - получают из шихты, содержащей **углерод** и **катализаторы**, при разогреве до **2800 °С** под давлением до **5 ГПа**.
- Зерна синтетического алмаза обычно **не являются монокристаллами**, а представляют собой **конгломерат сросшихся между собой мелких кристаллов**, поэтому они более хрупки, чем зерна природного кристалла, и менее прочны.

- **Электрокорунд** представляет собой кристаллическую окись алюминия Al_2O_3 с примесями окислов железа, кремния, титана и др.
- В зависимости от процентного содержания Al_2O_3 и примесей цвет порошка электрокорунда изменяется от белого до темно-коричневого. Белый электрокорунд содержит 96-99 % Al_2O_3 , нормальный (обычно серого цвета) 91-93 % Al_2O_3 .
- Электрокорунд получают сплавлением боксита с коксом и чугуновой стружкой в электропечи при температуре 1500-1750 °С.
- Электрокорунд - **самый распространенный абразивный материал**, применяемый в связанном или свободном виде **для шлифования оптических деталей**.

- *Карбид бора B_4C* - очень твердый абразив, получают при сплавлении шихты, состоящей из борной кислоты и кокса, при $T = 2500\text{ }^\circ\text{C}$. Применяют для шлифования твердых кристаллов: кварца, рубина, сапфира.
- Абразивные материалы после добычи или синтеза очищают от примесей, измельчают до определенной степени, дисперсности и классифицируют по размеру зерен - зернистости.

- **Классификация абразивных материалов по зернистости и зерновому составу.** Порошки электрокорунда, карбида бора и других абразивных материалов, кроме алмаза, в зависимости от размера зерен делят на группы:
 - шлифзерно (2000-160 мкм),
 - шлифпорошки (125-40 мкм),
 - микрошлифпорошки (63-14 мкм),
 - тонкие микрошлифпорошки (10-3 мкм),
 - а внутри группы классифицируют по зернистости.



Шлифующий абразив	Относительная шлиф способность
Алмаз	1
Нитрид бора	0,58-0,6
Карбид бора	0,5-0,6
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

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

- 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 передаётся стеклу через действие абразивного зерна. Приложение нагрузки к отдельному зерну имеет резко выраженный динамический характер. Динамическая сила R направлена по линии соединяющей 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 полированию.

**ДОПУСКИ НА ОПТИЧЕСКИЕ ПОВЕРХНОСТИ ПО
КРИВИЗНЕ, ФОРМЕ, КЛАССАМ ЧИСТОТЫ**

Виды поверхностей.

- Оптические детали ограничены поверхностями трех видов:
 1. исполнительными,
 2. вспомогательными,
 3. свободными.

- Исполнительные поверхности предназначены для выполнения деталью своего служебного назначения.
- Вспомогательные поверхности оптических деталей служат для присоединения к ним оправ.
- Свободные поверхности оптических деталей служат для выполнения законченных конструктивных и технологических форм (фаски).

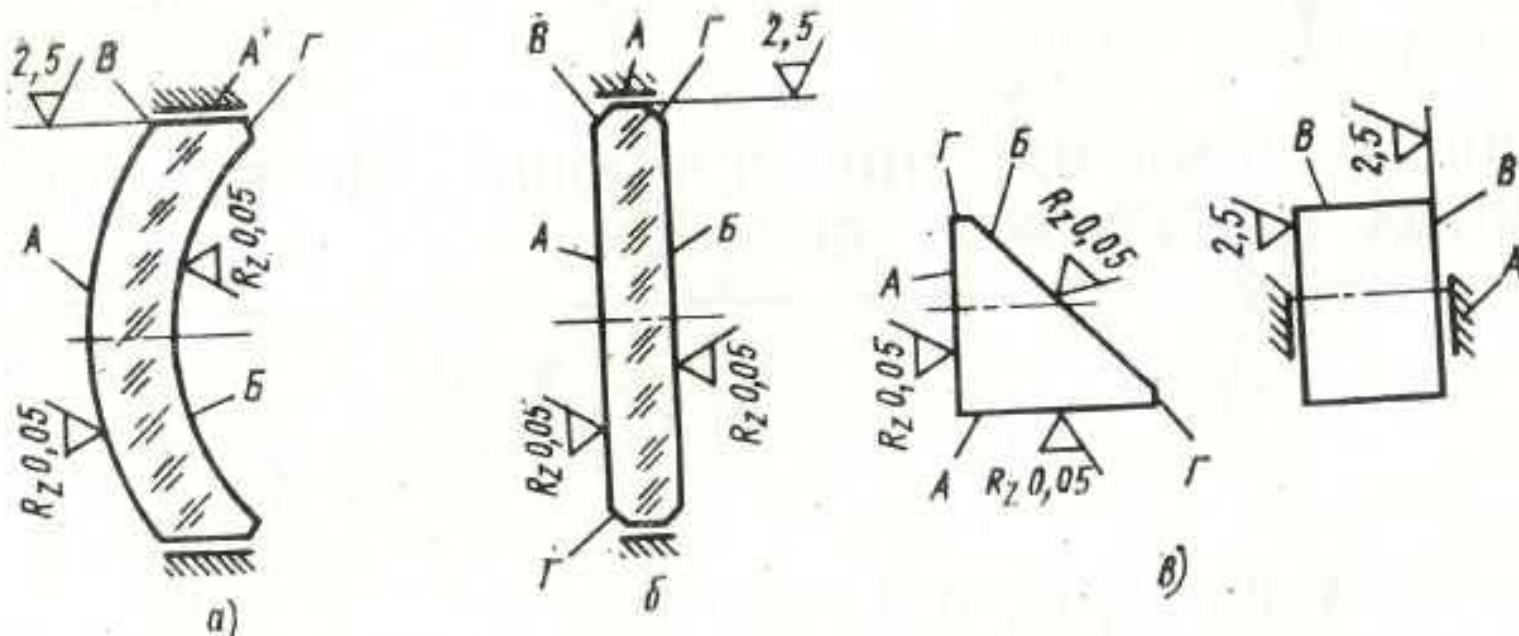


Рис. 61. Виды поверхностей:
a — у линзы; *б* — у пластинки; *в* — у призмы $AP = 90^\circ$

Исполнительные поверхности оптических деталей **A**, **B**, вспомогательные **B**, свободные **Г**.

Исполнительные поверхности оправ, обозначенные **A'**, служат для сопряжения со вспомогательными поверхностями **B** оптической детали.

- Полированные поверхности ОД имеют отклонение от заданных геометрически по стрелке кривизны $N < 2,5$ мкм,
- по форме $\Delta N < 0,5$ мкм.
- Параметр шероховатости $Rz = 0,1-0,05$ мкм (при указанной шероховатости на поверхностях могут быть дефекты чистоты, число и размеры которых ограничиваются ГОСТ).

Допуски

Чертежи оптических деталей.

- Оптические детали изображают на чертежах в соответствии с общими правилами, установленными ЕСКД и ГОСТ 2.412—81 (СТ СЭВ 139—74). Чертеж полностью характеризует оптическую деталь и служит исходным документом для разработки технологического процесса ее изготовления и контроля.
- При изображении оптической детали используют общие правила машиностроительного и приборостроительного черчения, но ввиду специфики ее служебного назначения требуются некоторые дополнения, а также выполнение особых нормативных требований.

Особенности выполнения чертежей оптических деталей по ГОСТ 2.412-81:

1. детали располагают на чертежах **по ходу луча света, идущего слева направо**;
2. числовое значение радиусов сферических исполнительных поверхностей обозначают буквой **R** ;
3. асферические поверхности определяют **уравнением** воспроизводящей кривой профиля поверхности вращения;
4. цилиндрические поверхности задают значением ее радиуса **R** , перед которым пишут «Цилиндр»;

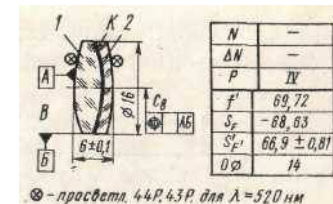
5. в правом верхнем углу чертежа располагают таблицу, в которой указывают **требования к материалу, требования к детали и оптические характеристики**;
6. в поле чертежа и примечаниях указывают дополнительные конструктивные особенности и технологические требования, например чертеж штрихов и цифр в увеличенном масштабе с указанием размеров, размер светового диаметра, размеры для справок отмечаются звездочкой и т. п., а также **обозначение материалов покрытия** с указанием его типа (табл.)

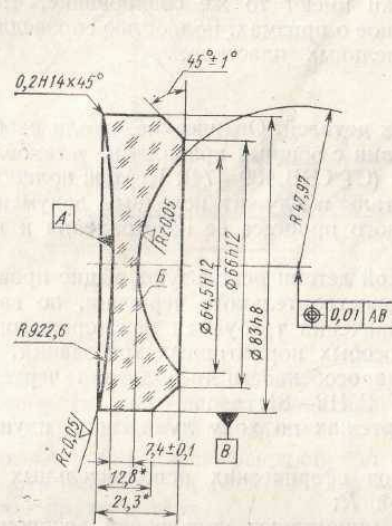
Обозначение типа покрытия

Тип покрытия	Сокращенное наименование	Обозначение на чертеже	Тип покрытия	Сокращенное наименование	Обозначение на чертеже
Отражающее:	Зеркальн.		Фильтрующее	Фильтр.	
			внешнее	Защитное	Защитн.
внутреннее	Светоделит.		Токопроводящее (обогревающее)	Токопров. (обогрев.)	
Светоделительное (полупрозрачное)			Поляризующее	Поляризующее	
Просветляющее	Просветл.				

- в штампе пишут наименование детали, марку стекла и ГОСТ, массу детали, масштаб чертежа;
- для сборочных единиц таблица состоит только из требования к изделию и оптических характеристик;

• склеиваемую поверхность выделяют линией двойной толщины и указывают стрелкой с буквой К в ее разрыве.



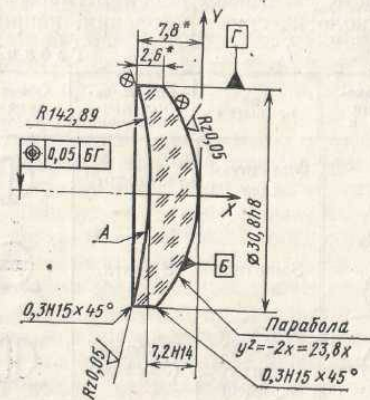


1.* Размеры для справок

Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	3Б
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	2
Бесвильность	1Б
Пузырность	3А
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
P_A	V
P_B	VI
$\Delta R_{A,B}$	2
f'	-74,22
S_F	78,55
$S_{F'}$	-74,45 ± 2,23
$O\Phi_A$	76
$O\Phi_B$	61



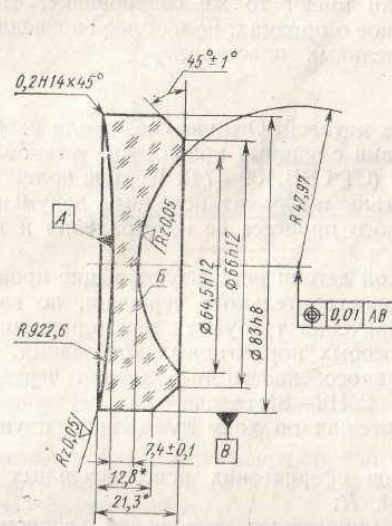
1.* Размеры для справок

2. ⊗_{AB} - просветл. 44Р.43Р. $\lambda = 520 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$

Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	-
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	3
Бесвильность	2Б
Пузырность	2Б
N_A	5
ΔN_A	0,5
P_A	IV
P_B	V
ΔR_A	2
f'	47,87
S_F	-42,62
$S_{F'}$	48,71 ± 0,81
$O\Phi_A$	26,1
$O\Phi_B$	28,1

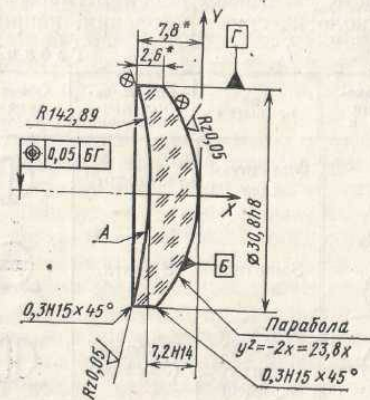


1.* Размеры для справок

Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	3Б
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	2
Бесвильность	1Б
Пузырность	3А
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
P_A	V
P_B	VI
$\Delta R_{A,B}$	2
f'	-74,22
S_F	78,55
$S_{F'}$	-74,45 ± 2,23
$O\Phi_A$	76
$O\Phi_B$	61



1.* Размеры для справок

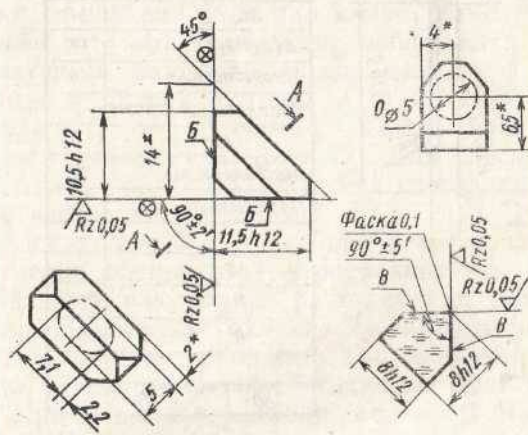
2. ⊗_{AB} - просветл. 44Р.43Р. $\lambda = 520 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$

Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	-
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	3
Бесвильность	2Б
Пузырность	2Б
N_A	5
ΔN_A	0,5
P_A	IV
P_B	V
ΔR_A	2
f'	47,87
S_F	-42,62
$S_{F'}$	48,71 ± 0,81
$O\Phi_A$	26,1
$O\Phi_B$	28,1

2,5/ (✓)

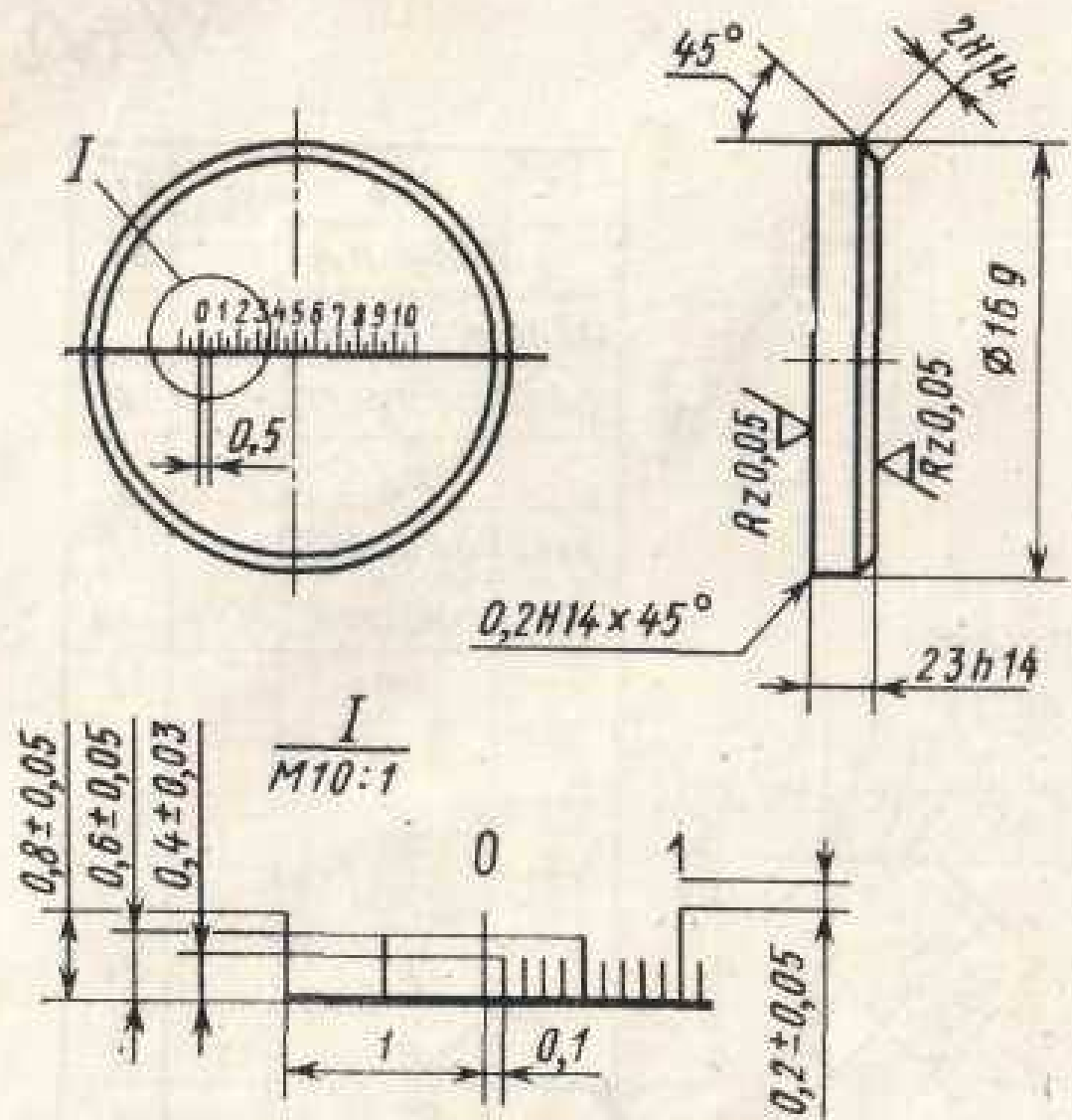


Δn_e	3Г
$\Delta(n_e - n_o)$	3Г
Однородность	
Двойной лучепрелом.	Е
μ_A	4
Бесцветность	1Б
Пузырность	3Д
N_B	2
ΔN_B	0,3
N_D	0,5
ΔN_D	0,2
ρ	IV
π	2'
δ_{45°	1'
ϵ	30''
l	14

1. Размеры для справок
 2. ⓧ-просветл. 24Н для $\lambda = 520 \text{ нм. } \pm 30 \text{ нм}$

Рис. 69. Призма с крышей AP — 90° из стекла К8 ГОСТ 3514—76

2,5 (V)



Δn_e	4Г
$\Delta(n_F' - n_C')$	4Г
Однородность	4
Двойное лучепрелом.	3
M_A	5
Бесвильность	2Б
Пузырность	1
N	-
ΔN	-
ρ	0-20
θ	15'
\emptyset	14

1. Ширина штрихов $0,015 \pm 0,003$ мм
2. Разность штрихов по ширине детали не более $0,003$ мм

Рис. 70. Сетка из стекла К8 ГОСТ 3514—76

Показатели качества деталей.

- В таблице чертежа указывают значения показателей качества материала.
- Значения оптических характеристик, помещенных в таблице, определены при габаритном расчете системы, и при подготовке производства технологии не должны их пересматривать.
- Для разработки технологического процесса изготовления оптических деталей наиболее важны требования, которые указаны на чертеже для изготовления.
- Наличие или отсутствие какого-либо показателя в таблице требований к детали имеет для процесса изготовления вполне определенный технологический смысл.
- Числовые значения показателей качества обуславливают трудоемкость и сложность обработки детали.

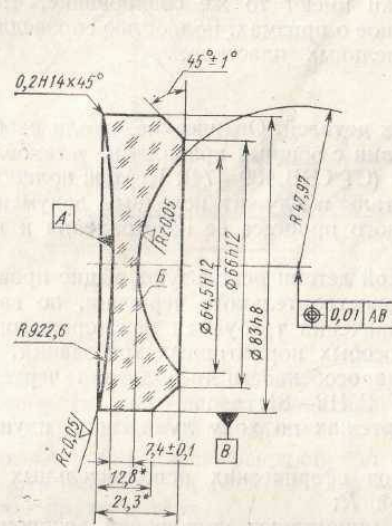
Показатели качества деталей.

Допуски на опические поверхности по

- Кривизне N
- Форме ΔN
- Классам чистоты P .

1. *Допуск на стрелку кривизны* исполнительных оптических поверхностей A и B измеряют числом интерференционных колец N_A , N_B . (см. рис. 67, $N_A = 5$ и $N_B = 3$) или полос, укладываемых на диаметре D при контроле пробным стеклом (оптическим калибром).

- В производственном обиходе интерференционную картину обычно называют «цветом», так как при освещении белым светом линии имеют радужную окраску.
- Измерения N надежны, если обрабатываемая поверхность имеет правильную сферическую форму. Показателям N_A и N_B прямо пропорциональны отклонения кривизны поверхностей от заданных расчетом.

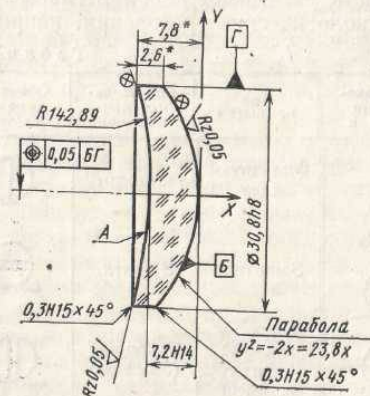


1.* Размеры для справок

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	3Б
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	2
Бесвильность	1Б
Пузырность	3А
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
P_A	V
P_B	VI
$\Delta R_{A,B}$	2
f'	-74,22
S_F	78,55
$S_{F'}$	-74,45 ± 2,23
$O_{\Phi A}$	76
$O_{\Phi B}$	61

Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76



1.* Размеры для справок

2. ⊗_{AB} - просветл. 44Р.43Р. $\lambda = 520 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	-
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	3
Бесвильность	2Б
Пузырность	2Б
N_A	5
ΔN_A	0,5
P_A	IV
P_B	V
ΔR_A	2
f'	47,87
S_F	-42,62
$S_{F'}$	48,71 ± 0,81
$O_{\Phi A}$	26,1
$O_{\Phi B}$	28,1

Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

В некоторых случаях N_A и N_B указывают со знаками плюс или минус.

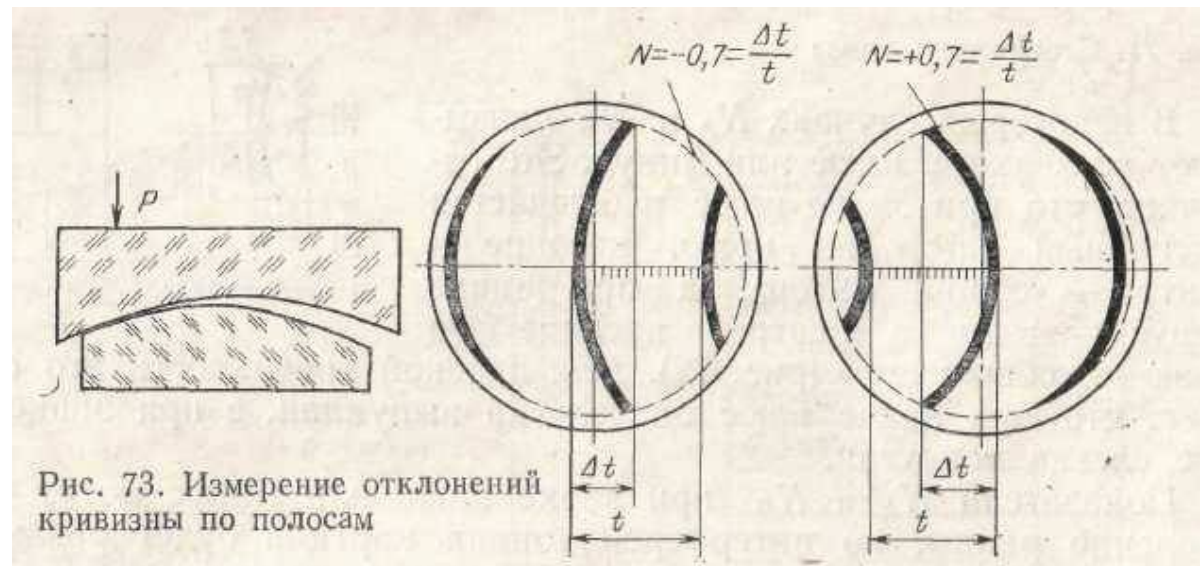
Это означает, что при знаке плюс наблюдается воздушный зазор на краю, касание в центре - «общий бугор», а при знаке минус - зазор в центре, касание на краю — «общая яма»

Для плоской поверхности это означает, что при знаке плюс она слегка выпуклая, а при знаке минус слегка вогнутая.

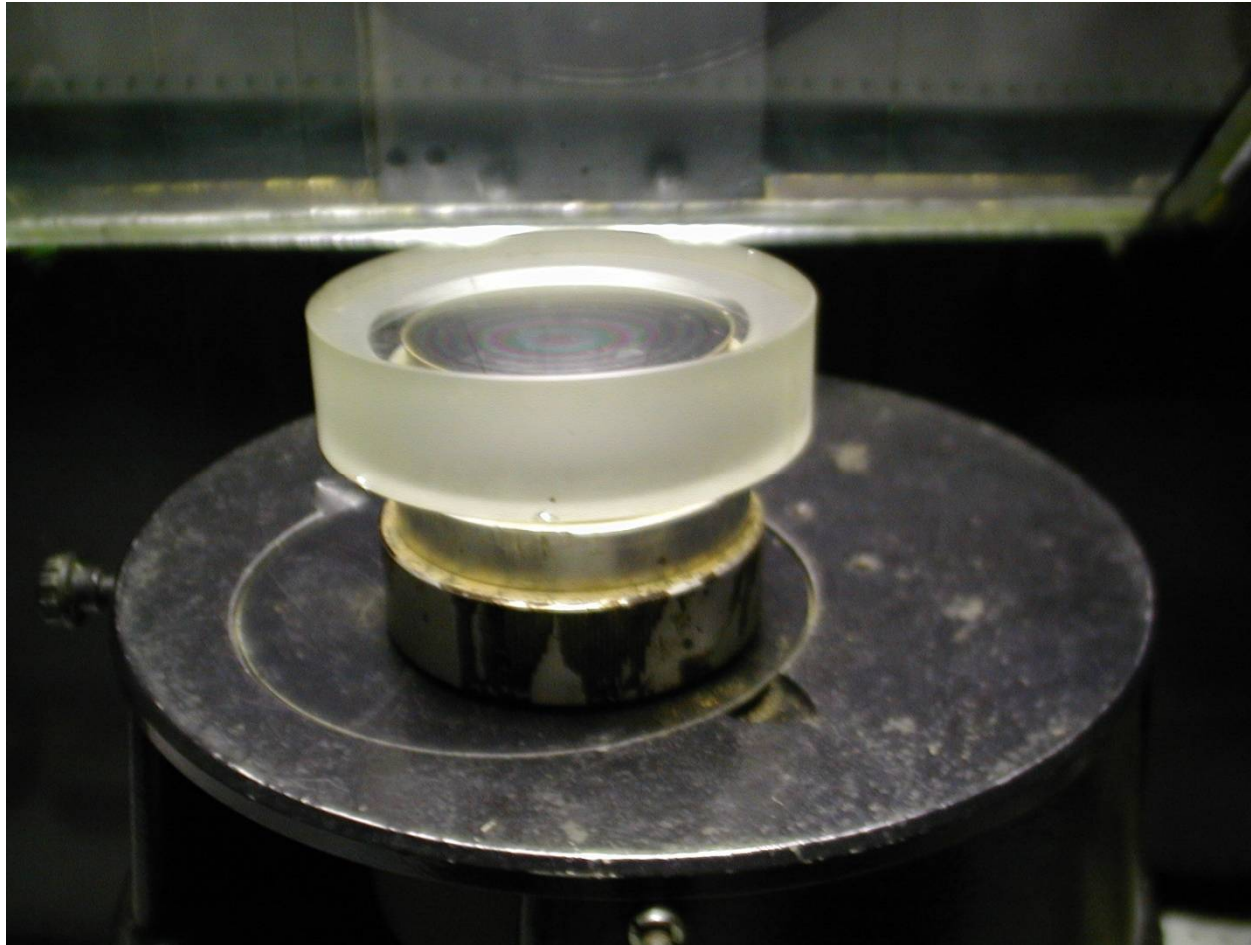


Рис. 72. Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы

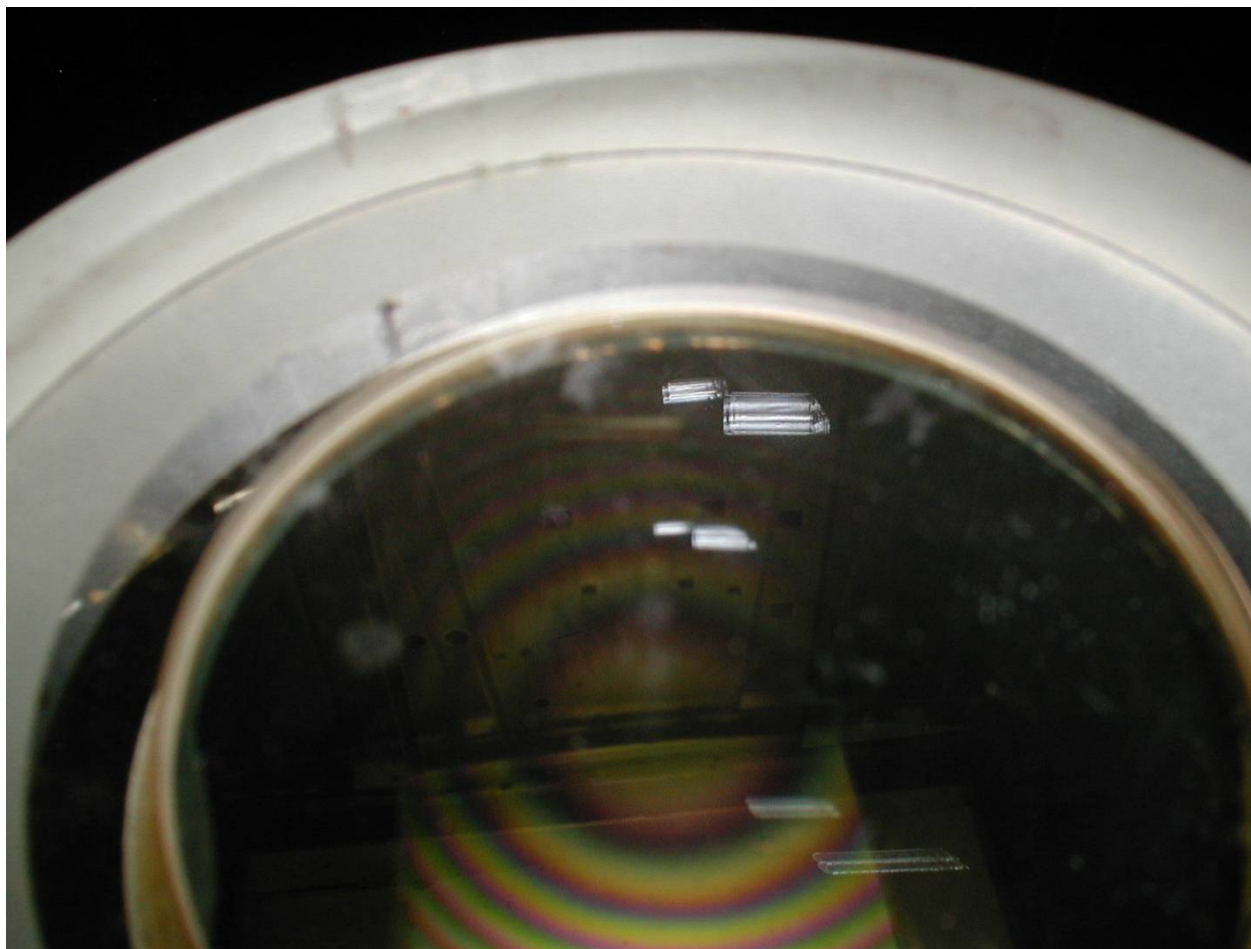
Значения N_A и N_B определяют по числу колец, видимых на площади детали под пробным стеклом (на рис. 72 $N = 3$), или по отношению $\Delta t/t$, определяющему изогнутость линий (на рис. 73 $N = 0,7$).



Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы



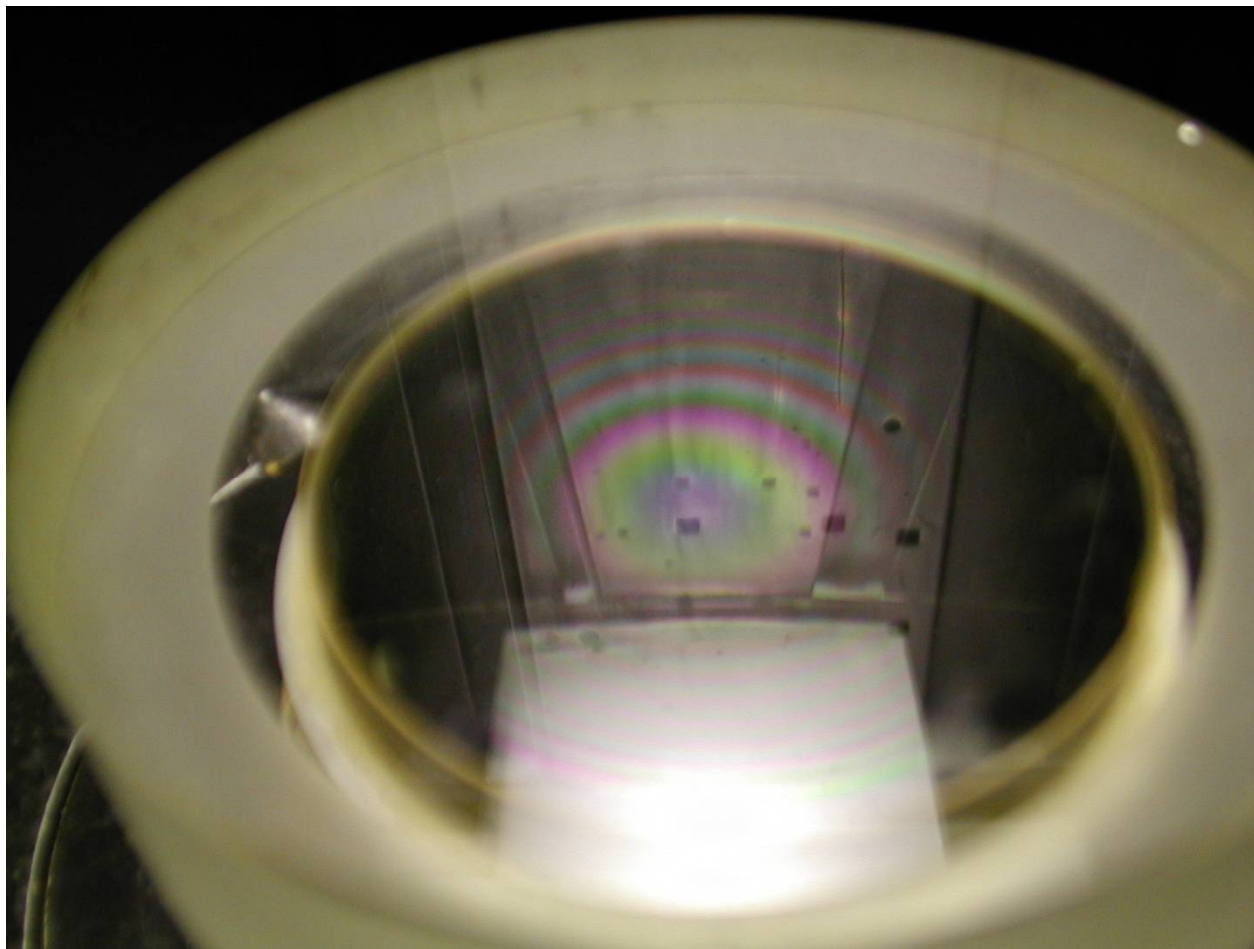
Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы



Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы



Измерение пробным стеклом отклонений кривизны поверхности линзы



Интерферометр



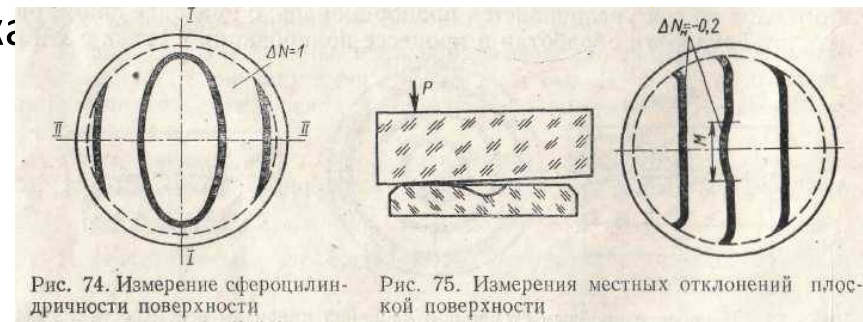
- Значениям N_A и N_B пропорциональна толщина слоя стекла, который надо споллировать, чтобы сделать отклонение кривизны поверхности меньше допустимой, заданной чертежом. Толщина этого слоя по оси увеличивается пропорционально квадрату диаметра детали.





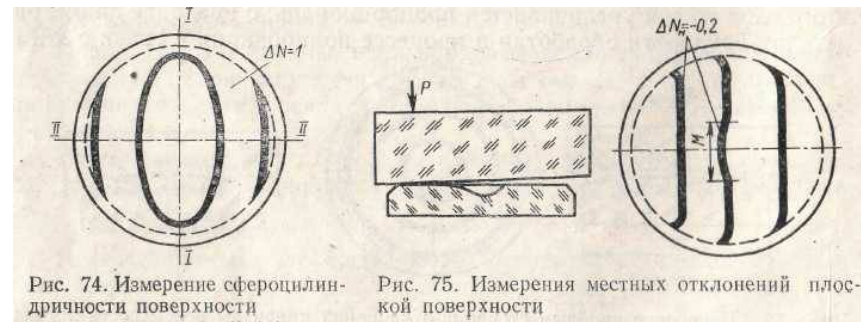
- Получение значений N_A и N_B , меньших заданных чертежом, составляет одну из главных задач, решаемых на операциях шлифования и полирования.

- **2. Допуск формы** исполнительных оптических поверхностей *A* и *B* вычисляют для диаметра детали как
- $\Delta N_D = (D / l)^2 \Delta N_M (D / D_M)^2 \Delta N_M$
- Где l , D_M , ΔN_M - соответственно длина, диаметр и значение местной ошибки.
- Местные ошибки формы бывают зональные, т. е. симметричные относительно вершины сферического сегмента, или несимметричные в разных местах поверхности.
- Зональные ошибки обнаруживаются как **кольцами**.

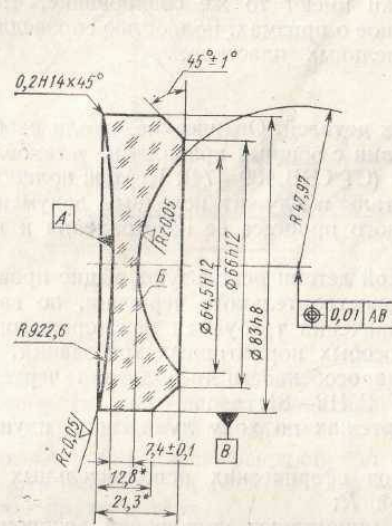


- Местные ошибки возникают как результат резкого несоответствия размеров инструмента и обрабатываемой поверхности, грубых ошибок в настройке станка, наличия неоднородностей и разной температуры притирающихся материалов.
- Ошибки формы $\Delta N \geq 3$ исправляют тонким шлифованием.

- Если на интерференционной картине кольца вытянуты в одном и сжаты в другом направлении или изогнутые полосы не составляют часть окружности, то имеется общее отклонение формы поверхности от сферической.
- Это отклонение называют **астигматизмом** поверхности. Геометрически это означает, что оптическая поверхность стала сфероцилиндрической (рис. 74). Значение астигматизма определяется как разность числа колец N по осям $I-I$ и $II-II$.



- *Допуск на дефекты чистоты полирования*
- P_A, P_B выражают в классах чистоты оптических поверхностей по ГОСТ 11141-76, которым оговорены размеры и число дефектов - царапин и точек (рис.67, $P_A V, P_B VI$).
- Требования регламентированы одиннадцатью классами P от IXa до I для поверхностей, удаленных от плоскостей изображения, и еще более строгим классом PO с подразделениями 0—40, 0—20, 0—10 для поверхностей, расположенных в плоскостях изображения предметов.
- Например, по классу P подразделением 0—10 допускается *ширина царапины 0,002 и диаметр точки 0,004 мм.*

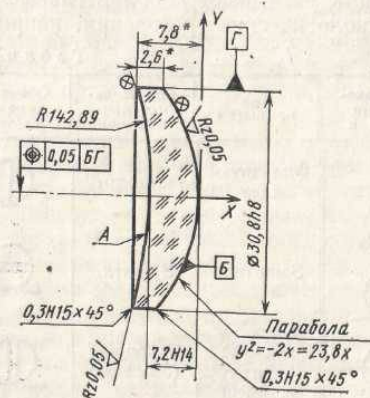


1.* Размеры для справок

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_F - n_{e'})$	3Б
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	2
Бесвильность	1Б
Пузырность	3А
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
P_A	V
P_B	VI
$\Delta R_{A,B}$	2
f'	-74,22
S_F	78,55
$S_{F'}$	-74,45 ± 2,23
$O_{\Phi A}$	76
$O_{\Phi B}$	61

Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76



1.* Размеры для справок

2. ⊗_{AB} - просветл. 44Р.43Р. $\lambda = 520 \text{ нм} \pm 20 \text{ нм}$

2,5/ (✓)

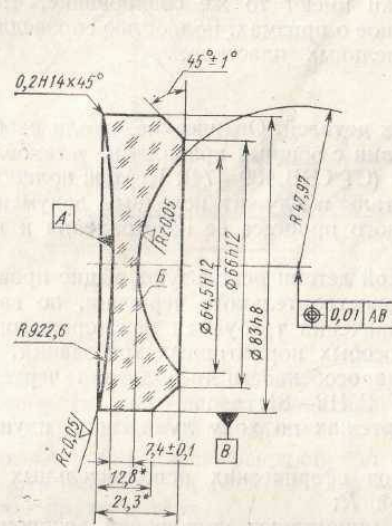
Δn_e	3Б
$\Delta(n_F - n_{e'})$	-
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	3
Бесвильность	2Б
Пузырность	2Б
N_A	5
ΔN_A	0,5
P_A	IV
P_B	V
ΔR_A	2
f'	47,87
S_F	-42,62
$S_{F'}$	48,71 ± 0,81
$O_{\Phi A}$	26,1
$O_{\Phi B}$	28,1

Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

- Очень трудно не допустить появления царапин и точек на полированных оптических поверхностях. Главными причинами их образования являются загрязнение среды, окружающей рабочее место оптика, и загрязнение порошкообразных шлифующих и полирующих материалов.

Элементы оптических приборов	Допуски на оптические поверхности по		
	кривизне N	форме ΔN	классам чистоты P
Объективы:			
коллиматоров и астрономические	1—3	0,2—0,3	VII, VIII
телескопические	3—5	0,3	IV, V
аэрофотосъемочные	1—3	0,1—0,5	IV—VI
фотографические	3—5	0,3—0,5	IV—VI
микроскопов:			
до $10\times$	2—3	0,2—0,5	III
от $10\times$ до $40\times$	1—2	0,1—0,2	II
свыше $40\times$	0,5—1,0	0,1—0,2	III—V
Окуляры, лупы	3—5	0,5—1,0	III—V
Призмы:			
отражающие поверхности	0,5—1,0	0,1—0,3	II, III
преломляющие поверхности	2—4	0,5—1,0	III, IV
Сетки и коллективы	5—10	1,0—2,0	0—10, 0—20, 0—40
Защитные стекла и светофильтры перед объективом	3—5	0,3—0,5	V
Светофильтры за и перед окуляром	5—10	0,8—2	II, III
Зеркала средней точности	1,0—2,0	0,2—0,3	III, IV

- *Допуск на децентрировку* линз выражают в долях миллиметра (на рис. 67 0,01 | АВ).
- Значения децентричности указывают на параллельное смещение геометрической оси симметрии вспомогательной сборочной цилиндрической поверхности от оптической оси исполнительных поверхностей линзы.
- Это допуск на взаимное расположение двух исполнительных и одной вспомогательной поверхности линз, их относительный поворот или смещение.

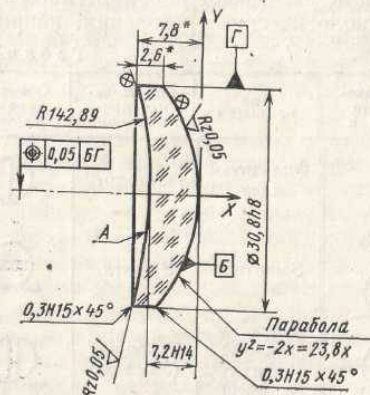


1.* Размеры для справок

Рис. 67. Линза из стекла Ф1 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	3Б
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	2
Бесвильность	1Б
Пузырность	3А
N_A	5
ΔN_A	0,5
N_B	3
ΔN_B	0,3
P_A	V
P_B	VI
$\Delta R_{A,B}$	2
f'	-74,22
S_F	78,55
$S_{F'}$	-74,45 ± 2,23
$O_{\Phi A}$	76
$O_{\Phi B}$	61



1.* Размеры для справок

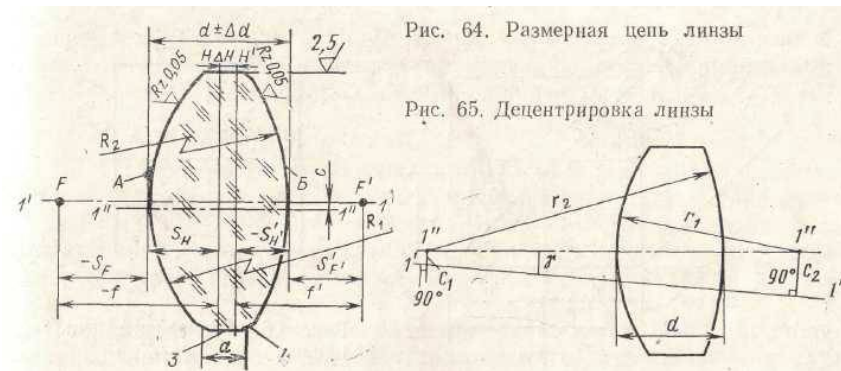
2. ⊗_{AB} - просветл. 44Р.43Р. $\lambda = 520 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$

Рис. 68. Линза с асферической поверхностью из стекла БК10 ГОСТ 3514—76

2,5/ (✓)

Δn_e	3Б
$\Delta(n_f - n_e')$	-
Однородность	3
Двойное лучепреломл.	3
M_A	3
Бесвильность	2Б
Пузырность	2Б
N_A	5
ΔN_A	0,5
P_A	IV
P_B	V
ΔR_A	2
f'	47,87
S_F	-42,62
$S_{F'}$	48,71 ± 0,81
$O_{\Phi A}$	26,1
$O_{\Phi B}$	28,1

- Если оптическая ось $1' - 1'$ проходит под углом к геометрической оси $1'' - 1''$ цилиндрической поверхности, то это называют децентрировкой первого рода (см. рис. 65). На чертеже ее выражают допуском, приводя к децентрировке второго рода как параллельному смещению осей по формуле
- $c = \gamma (n - 1)f = (c_1 + c_2)/2$.



- Возникает децентричность на первых операциях поштучной обработки и при блокировании линз вследствие погрешностей базирования при установке заготовок.
- Децентрировку уменьшают до допустимых значений шлифованием на операции, выполняемой после полирования второй стороны линзы.