

**Лабораторная работа №2**  
**МИКРОСКОП И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**  
**ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО**  
**КОНТРОЛЯ**

*Цель работы* - изучение устройства, оптической схемы микроскопа и его применение для контроля геометрических параметров прозрачного объекта.

Микроскоп - один из наиболее распространенных приборов визуального оптического контроля геометрических и оптических параметров объектов малых размеров. Он широко применяется в различных отраслях науки и техники (физика, химия, биология, медицина, металлургия, производство микросхем и т.д.).

Рассмотрим устройство типичного микроскопа на примере микроскопа МБР-1 (рис. 2.1). Он состоит из двух систем – *наблюдательной*, в которую входит объектив 1 и окуляр 2, вмонтированные в тубус микроскопа 3, и *осветительной*, состоящей из зеркала 4, конденсора 5 с ирисовой апертурной диафрагмой 6 и съёмного светофильтра 7.

На металлическом устойчивом основании микроскопа 8 укреплена коробка с механизмом микрометрической фокусировки 9. По одну сторону её привинчена конструкция 10, обеспечивающая перемещение конденсора, а по другую – тубусодержатель 11, имеющий форму дуги.

Механизмы грубой и микрометрической фокусировки приводятся в движение вращением рукояток 12 и 13 соответственно, причём их повороты против часовой стрелки поднимают тубус, а по часовой - опускают относительно предметного столика 14. Последний крепится к коробке механизма микрометрической фокусировки с помощью специального кронштейна.

На оси левой рукоятки механизма микрометрической фокусировки имеется барабан со шкалой 15, отсчёт по которой разрешает измерять

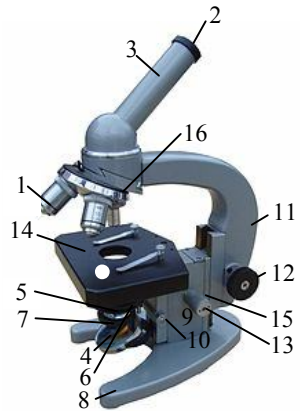


Рис. 2.1. Общий вид микроскопа МБР-1.

перемещение тубуса (оно порядка 2,2 мм) с точностью до 2 мкм.

Быстрая смена и центрирование объективов производится с помощью револьвера 16. Принципиальная оптическая схема микроскопа показана на рис. 2.2 [4].

Как видно из рис. 2.2а, объектив строит увеличенное действительное изображение объекта АВ в передней фокальной плоскости окуляра  $F_2$ . Это изображение рассматривается глазом через окуляр 2, как через лупу, причем в зависимости от положения промежуточного изображения относительно фокуса  $F_2$ , изображение  $A'B'$  проецируется или на бесконечность ( $A'B'$  совпадает с  $F_2$ ), или на расстояние наилучшего зрения наблюдателя ( $A'B'$  находится за фокусом  $F_2$ ).

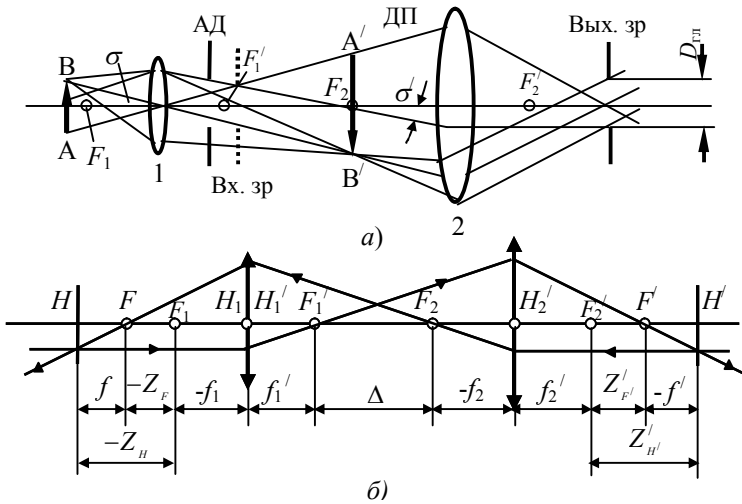


Рис. 2.2 Принципиальная оптическая схема и ход лучей в микроскопе:  
 а) АД – апертурная диафрагма и выходной зрачок объектива, ДП – поле-  
 вая диафрагма, Вх. зр. – входной зрачок объектива и микроскопа, Вых. зр. –  
 выходной зрачок микроскопа и зрачок глаза,  $H$  и  $H'$  – главные плоскости  
 системы микроскопа,  $\sigma$  и  $\sigma'$  – апертурные углы объектива и окуляра;  
 б)  $H_1$  и  $H_1'$  – главные плоскости окуляра,  $H_2$  и  $H_2'$  – главные плоско-  
 сти объектива.

Величина  $\Delta$  (рис. 2.2 б) называется *оптическим интервалом микроскопа* или оптической длиной тубуса микроскопа.

Заднее  $f'$  и переднее  $f$  – *фокусные расстояния микроскопа* как двухкомпонентной системы определяются формулами:

$$f' = -f_1' f_2' / \Delta, \quad f = f_1 f_2 / \Delta, \quad (2.1)$$

где индексами 1 и 2 обозначены соответствующие фокусные расстояния объектива 1 и окуляра 2.

Положения фокусов  $F$  и  $F'$  микроскопа задаются соотношениями:

$$Z_F = f_1 f_1' / \Delta, \quad Z_{F'} = -f_2 f_2' / \Delta, \quad (2.2)$$

а положения главных плоскостей системы - следующими формулами:

$$Z_H = Z_F - f', \quad Z_{H'} = Z_{F'} - f'. \quad (2.3)$$

Обычно при работе с микроскопом изображение А'В' лежит в передней фокальной плоскости окуляра  $F_2$ , т.е. на расстоянии  $\Delta$  от заднего фокуса объектива  $F_2'$ , тогда линейное увеличение объектива  $\beta_{об}$  равно

$$\beta_{об} = -\Delta / f_1'. \quad (2.4)$$

Линейное увеличение окуляра  $\beta_{ок}$  всегда равно

$$\beta_{ок} = L / f_1', \quad (2.5)$$

где  $L = 0,25$  м – расстояние наилучшего зрения, следовательно, *общее увеличение микроскопа* составляет

$$\beta = \beta_{об} \beta_{ок} = -L \Delta / f_1' f_2'. \quad (2.6)$$

Значение  $\beta$  также можно выразить через *входную числовую апертуру объектива (микроскопа)*  $A = n \sin \sigma$  ( $n$  – показатель преломления среды, в которую помещен исследуемый объект,  $\sigma$  – апертурный угол объектива (рис. 2.2)), и диаметр оптического зрачка глаза  $D_{гл} \approx 5,7$  мм (для редуцированного глаза), а именно

$$\beta = -2AL / D_{гл}. \quad (2.7)$$

Знак минус в формулах (2.6) и (2.7) означает, что микроскоп дает обратное изображение.

Объективы микроскопов всегда изготавливаются с предельно большими апертурами, которые к тому же можно еще увеличить с помощью *иммерсии*, т.е. заполнения пространства между объектом и линзой маслом с показателем преломления близким к показателю преломления линзы объектива.

Отметим, что разделение наблюдательной системы микроскопа на две самостоятельные части дает возможность устанавливать в плоскости промежуточного изображения (А'В') шкалы и микрометры, а также позволяет изменять увеличение микроскопа путем смены объективов и

окулярров.

### Методика выполнения работы

а) В основе метода, применяемого в настоящей работе для контроля геометрии прозрачных объектов, лежит явление зависимости их толщины, наблюдаемой человеком, от истинной толщины. Суть этого явления иллюстрирует рис. 2.3 [5].

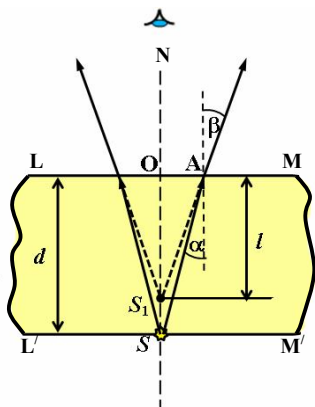


Рис. 2.3. Кажущееся уменьшение толщины прозрачной пластинки источник, дающий расходящийся световой пучок, который на границе стекло-воздух (линия LM), вторично преломившись, выйдет в среду оптически менее плотную, а потом разойдется еще больше. Локализация точки, в которой пересекутся продолжения лучей, идущих в воздухе, будет зависеть от угла между линией зрения и плоскостью пластинки. Наблюдателю, если он смотрит вдоль направления нормали NS, точка S покажется приподнятой над её истинным положением на величину  $SS_1$ .

Зная абсолютный показатель преломления пластинки  $n$ , можно определить её толщину. Действительно, из треугольника OSA имеем

$$OA = OS \operatorname{tg} \alpha ,$$

из треугольника  $OS_1A$

Пусть  $LMM'/L'$  представляет собой сечение вертикальной плоскостью небольшого участка тонкой стеклянной пластинки (с показателем преломления  $n$ ), которую в пределах поля зрения микроскопа можно считать плоскопараллельной. На нижней поверхности этой пластинки проведена (фломастером или маркером) узкая полупрозрачная линия S. Благодаря преломлению света, идущего снизу, линию можно рассматривать как своеобразный

$$OA = OS_1 \operatorname{tg} \beta .$$

Так как углы  $\alpha$  и  $\beta$  малы, то

$$\frac{OS}{OS_1} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha} \approx \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = n ,$$

$$OS = n \cdot OS_1 .$$

Обозначив толщину OS пластинки через  $d$ , а кажущуюся толщину пластинки  $OS_1$  - через  $l$ , получим

$$d = n l . \quad (2.8)$$

б) *Промоделируем производственный процесс контроля качества изделия* по параметру макронеровности поверхности (плоскостности, плоскопараллельности).

Подобный контроль необходим при изготовлении оптических деталей с хорошими полированными плоскостями. Эти детали используются в ряде контрольно-измерительных приборов и для юстировочных работ. Плоскость, обработанная с погрешностью не более  $\pm 0,05$  длины световой волны, считается первоклассной.

В производственных условиях для контроля плоскостности наиболее экономичными и точными являются теневые и интерференционные методы [6]. Однако, так как основная задача работы на настоящем этапе - изучение современной методики контроля качества, то воспользуемся простейшим методом, основанным на описанном выше физическом эффекте. В нашем случае мерой неровности поверхности стеклянной пластины может служить величина  $r = |1 - d/d_0|$ , где  $d_0$  - толщина пластинки в некотором произвольно выбранном месте (обычно ближе к центру). Полагая, что изменение показателя преломления вдоль пластины мало, и используя соотношение (2.8), получим формулу

$$r = |1 - l/l_0| , \quad (2.9)$$

которая в настоящей работе определяет контролируемый параметр объекта. Здесь  $l_0$  - кажущаяся толщина пластинки в том же месте, где измерялась  $d_0$ .

Одним из самых распространенных методов производственной

системы управления качеством являются *контрольные карты* [7]. С помощью метода контрольных карт можно получить информацию о *ходе процесса* производства, этот метод позволяет увидеть, *когда и где* технологические параметры продукции выходят за рамки случайных колебаний, что указывает на возможный сбой в процессе, а значит, дает возможность *своевременно* принять необходимые меры по устранению неполадки.

Идея контрольной карты (КК) проста. Производятся независимые случайные многократные измерения (выборки) контролируемого параметра объекта контроля (ОК). На основе предположения о возможном характере распределения [7] совокупности измерений (для количественных характеристик ОК это, как правило, нормальный закон распределения, а для качественных – биномиальное или пуассоновское распределение), рассчитываются статистические характеристики каждой выборки, а также *верхняя (ВГР) и нижняя (НГР) границы регулирования* измеряемого параметра. Если исследуемый параметр для данной выборки лежит между границами регулирования, то процесс идет нормально, если же он приближается к ним или, тем более, выходит за них, значит в производственном процессе возникло устойчивое вредное воздействие, которое необходимо как можно скорее обнаружить и устранить.

В следующем разделе описания работы приведен порядок расчета и составления одной из самых простых и распространенных КК –  $\bar{X}$  - карты Шухарта [7].

#### ***Порядок выполнения работы***

1. Получить у лаборанта контрольные образцы - набор тонких пластинок, нарезанных из одного листа стекла.
2. Нанести маркером (фломастером) на одну из граней каждой пластинки 11 рисок (риска S на рис. 2.4) длиной около 5 мм. Расположение рисок произвольно, но желательно расположить их равномерно по поверхности пластинки. Перевернуть пластинку и нанести другим маркером (контрастного с первым цвета) риски (риска O на рис. 2.4) таким образом, чтобы на просвет они попарно образовывали кресты с рисками на первой грани. Пронумеровать полученные

марки цифрами от 0 до 10, причем марка с номером 0 должна находиться вблизи центра пластинки.

3. Положить стеклянную пластинку на предметный столик микроскопа так, чтобы в центре поля зрения находилась точка пересечения рисок нулевой марки.
4. Вращая рукоятку грубой фокусировки против часовой стрелки и осторожно вращая рукоятку механизма микрометрической фокусировки в том же направлении до отказа, поднять тубус микроскопа в крайнее верхнее положение. На отсчетном барабане механизма микрометрической фокусировки отсчитать деление, совпадающее с отсчетной черточкой, и записать его, приняв за нулевой отсчет  $B_0$ . Рекомендуемая форма таблицы наблюдений приведена в приложении А к описанию работы (Таблица 2.А.1).
5. После этого медленным вращением по часовой стрелке рукоятки грубой фокусировки опускать тубус микроскопа до тех пор, пока в поле зрения окуляра не получится наиболее отчетливое изображение риски  $O$ , нанесенной на верхней поверхности пластинки (рис. 2.4).
6. Вращая рукоятку механизма микрометрической фокусировки до тех пор, пока не получится наиболее отчетливое изображение риски  $S$ , нанесенной на нижней поверхности, отсчитать деление на барабане и записать новый отсчет  $B_1$ , по этим данным найти значение  $n_{\text{дел}} = B_1 - B_0$ . При этом надо сосчитать число полных оборотов барабана  $N_{\text{об}}$  (один оборот барабана соответствует перемещению тубуса на 0,1 мм). Кажущуюся толщину определить по соотношению:  $l = 0,1 \cdot N_{\text{об}} + 0,02 \cdot n_{\text{дел}}$ . Как видно из рисунка 2.4, смещение тубуса микроскопа  $l$  равно не всей толщине пластинки  $d$ , а только отрезку  $OS_1$ , поскольку вследствие преломления светового пучка линия  $S$  будет казаться смещенной в положение ( $S_1$ ), а расстояние  $h$  при фокусировке остается постоянным).
7. Переместить пластинку на следующую марку и повторить п.п. 3–6.
8. Для каждого  $l_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 10$ ) по формуле (2.9) найти значение параметра плоскостности  $r_i$ .



9. Определить для данной ( $p$ -ой) выборки среднее  $\bar{r}_p$  - и размах  $R_p$ :

$$\bar{r}_p = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N}, R_p = \max r_i - \min r_i, \quad (2.10)$$

где  $N = 10$  - объем выборки.

10. Найти абсолютную погрешность  $i$ -го наблюдения параметра плоскостности

$$\Delta r_{pi} = \left| \bar{r}_p - r_i \right| \quad (2.11)$$

и вычислить дисперсию выборки  $s_p$

$$s_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta r_{pi})^2}{N}}. \quad (2.12)$$

Значения  $\bar{r}_p$  и  $s_p$  занести в таблицу.

11. Взять другой контрольный образец и повторить с ним измерения согласно п.п. 3–10, заполняя соответствующие графы таблицы наблюдений (табл. 2.А.1). При недостатке времени на лабораторной работе можно свести в итоговую таблицу результаты, полученные разными наблюдателями.
12. Перенести в таблицу построения КК (табл. 2.А.2) значения  $\bar{r}_p, R_p, s_p$  для отдельных выборок. По  $p$  выборкам объема  $N$  вычислить оценку математического ожидания совокупности  $E(r)$  и ее среднего размаха  $\bar{R}$  :

$$E(r) = \frac{\sum_{i=1}^p \bar{r}_p}{P}, \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^p R_p}{P}, \quad (2.13)$$

где  $P$  – количество выборок в контролируемой совокупности. Для  $\bar{X}$ -карты Шухарта  $E(r)$  определяет положение центральной (нулевой) линии  $\underline{C}$  (рис. 2.5).

13. Найти нижнюю (НГР) и верхнюю (ВГР) границы регулирования

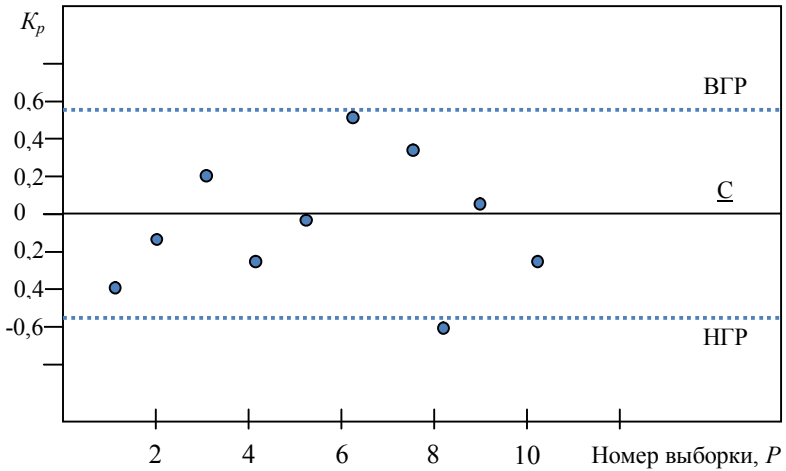


Рис. 2.5. Образец контрольной  $\bar{X}$  карты Шухарта

$$\left. \begin{array}{l} \text{ВГР} \\ \text{НГР} \end{array} \right\} = \pm(E(r) + A_2 \bar{R}), \quad (2.14)$$

где  $A_2$  - коэффициенты (табл. 2.1), зависящие от объема выборки и рассчитанные из условия, что  $A_2 \bar{R}$  оценка утроенной дисперсии  $\bar{r}_p$  [7]. Провести линии ВГР и НГР на контрольной карте.

Таблица 2.1 - Коэффициенты для расчета верхней и нижней границ регулирования

Число наблюдений в выборке, $N$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A_2$	1,880	1,023	0,729	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337	0,308

14. Вычислить

$$K_p = \bar{r}_p - E(r) \quad (p = 1, 2, \dots, P) \quad (2.15)$$

и проставить на поле контрольной карты (рис. 2.5) точки, соответствующие этой величине. Сделать вывод о характере управления каче-

ством на заводе – производителе исследуемого стекла.

15. Если объемы выборок неравные, то алгоритм построения контрольной карты, изложенный в п.п. 12–14, следует несколько изменить (см. [7, с. 375-376]).

*Приложение А*

Таблица 2.А.1– Результаты наблюдений плоскостности отдельного образца

(единичная выборка с номером  $P$ )

Нулевой отсчет  $B_0 =$

$i$	$N_{об}$	$n_{дел}$	$l_i, мм$	$r_i$	$\bar{r}_p$	$R_p$	$\Delta r_{pi}$	$s_p$
1								
2								
3								
...								
$N$								

Таблица 2.А.2 – Расчеты для построения  $\bar{X}$  -карты контроля плоскостности

Объем отдельных выборок  $N =$

$p$	Параметры выборок			$E(r)$	$\bar{R}$	ВГР	НГР	$K_p$
	$\bar{r}_p$	$R_p$	$s_p$					
1								
2								
3								
...								
$P$								

***Контрольные вопросы***

1. Из каких элементов состоит наблюдательная система микроскопа?
2. Из каких элементов состоит осветительная система микроскопа?
3. Каким является изображение предмета в микроскопе?
4. Где необходимо расположить предмет при рассматривании его в микроскоп, чтобы получить четкое увеличенное изображение?

5. Чем ограничивается предел увеличения микроскопа?
6. Чему равно смещение тубуса микроскопа при последовательном рассмотрении в нем рисок на верхней и нижней гранях пластинки?
7. Вращением какой рукоятки добиваются опускания тубуса для фокусировки риска на нижней грани?
8. Укажите, при каком условии справедлива формула  $n = \frac{d}{l}$ ?
9. Какой параметр служит в данной работе мерой неровности поверхности стеклянной пластины?
10. Как с помощью контрольной карты можно определить существует ли сбой в процессе производства стекла?