

**Министерство высшего и среднего специального образования  
РСФСР**

**Ордена Трудового Красного Знамени  
Научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)**

**Преприят № 103**

**БЕСКОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ  
ФОРМЫ ЗЕРКАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ**

**Б.Н. Колесов,  
" В.В. Гушин,  
Е.А. Алексанкина**

**Горький - 1976 г.**

Контроль формы поверхности является одной из актуальных и сложных технических задач, решаемых как в процессе производства изделия, так и при его эксплуатации.

Возрастающие требования к точности изготовления геометрических обводов летательных аппаратов заставляют искать новые методы контроля, обеспечивающие большую информативность, производительность, наглядность результатов контроля и возможность их документирования, исключающую влияние субъективных факторов. Последние несмотря на применение высокоточных средств измерения могут вносить в результаты измерения ошибки, в некоторых случаях составляющие едва ли не весь допуск на контролируруемую величину [1,2].

В настоящее время для контроля поверхностей двойной кривизны наибольшее применение находят шаблоны, значительно меньшее распространение имеют координатно-измерительные стенды, оптические методы. Известны различные накладные приборы, позволяющие определить кривизну контролируемой поверхности, ее отклонения от теоретического профиля, фактический профиль поверхности (МАИ-207 и др.). В литературе [3, 4] имеются систематизированные описания этих традиционных методов и средств.

В силу высокой стоимости и трудоемкости изготовления шаблонов с их помощью обеспечивается контроль профиля лишь в отдельных сечениях, например, 4 + 5 на крыле легкого самолета. При нивелировке крыльев самолета также обычно контролируется взаимное положение лишь нескольких точек по сечениям крыла. Для оценки

аэродинамических качеств самолета: путевой, продольной и поперечной балансировки, — этих данных явно недостаточно.

Поэтому при летных испытаниях серийных самолетов практически каждый самолет подвергается аэродинамической доводке. Неполнота данных о фактических обводах крыла, асимметрии крыльев, а также недостаточная точность измерений не позволяют надежно прогнозировать до полета балансировочные характеристики самолета с тем, чтобы воспользоваться аэродинамическими компенсаторами в целях устранения ожидаемого дефекта [4]. Таким образом, стоит задача разработки принципиально новых методов, позволяющих получать практически неограниченное количество данных об обводах контролируемых поверхностей. Разрешение этой задачи выходит далеко за рамки технического обеспечения возможности прогнозирования балансировочных характеристик самолета и представляет самостоятельный интерес.

Анализ возможных путей решения задачи показал, что особой ценностью представляют бесконтактные методы контроля. В литературе практически отсутствуют сведения о бесконтактных методах, пригодных для применения в условиях производства. В практике исследовательских лабораторий для изучения топологии пластин применяется зеркально-оптический метод Лигтенберга [5] в различных модификациях. Метод состоит в том, что перед зеркальной контролируемой поверхностью помещают экран с нанесенным на нем растром и фотографируют отражение раstra в контролируемой поверхности. Искривление поверхности пластины вызывает искажения отраженного изображения раstra. Накладывая на него эталонный растр, получают муаровые полосы, являющиеся линиями уровня наклона поверхности пластины. Метод неудобен для осуществления производственного контроля, так как требует высокой зеркальности поверхности и установки перед ней громоздкого экрана. Недостаточная зеркальность является препятствием и для применения других известных методов: Сала-Икеды, Теокариса [5, 6]. Однако, использование свойства зеркальности представляет большой интерес, поскольку открывается возможность применить в отличие от метода светового сечения [7]

принцип оптического рычага, обеспечив тем самым высокую чувствительность и точность метода контроля. Таким образом, в настоящей работе стояла задача разработать удобный для производства метод контроля поверхностей, обладающих невысокими свойствами зеркальности.

Для определения высоты волн на море Хубертом и Миннартом [8] были установлены зависимости между формой блика отражения Луны или Солнца в поверхности волнующегося моря и крутизной волны при различной угловой высоте светила над горизонтом и высоты точки наблюдения. Их теория построена на использовании закона отражения от зеркальной поверхности и построении изображения точечного источника света, помещенного над поверхностью. В применении к технике этот подход может быть полезен для оценки шероховатости поверхности. Форма блика может характеризовать и форму поверхности, но лишь по одному из направлений, а именно, в направлении, перпендикулярном линии блика, что не всегда удобно. К тому же, как показано в настоящей работе, ряд поверхностей обладают зеркальностью достаточной, чтобы можно было наблюдать в них отражение источника света, помещенного на высоте  $1 + 1,5$  м над поверхностью, а это позволяет получить о форме поверхности более полную информацию. Идея использованного в настоящей работе метода [9, 10, 11] состоит в установлении аналитической связи между формой поверхности и формой линии отражения протяженного щелевого источника света характерной формы, например, прямолинейного. Рассчитав линию отражения по алгоритму, легко реализуемому на ЭВМ, можно построить шаблон линии отражения, являющийся, по существу, носителем формы поверхности так же, как и обычные шаблоны. Но в отличие от них, этот шаблон имеет минимальную стоимость и небольшие размеры, легко копируется методом контактной печати. Шаблон накладывается на экран фотокамеры, куда проектируется линия отражения от реальной поверхности, получаемая при тех же положениях источника света, поверхности и точки наблюдения, при которых рассчитана и построена линия отражения на шаблоне. Таким образом, контроль сводится к обычному

сравнению теоретической линии с фактической и установленными допусками на ее искажения. Достигнутый уровень точности изготовления обводов крыла позволяет говорить, что задача контроля обводов сводится к контролю местных отклонений от теоретического профиля. Такая задача, как известно, вообще характерна для плазово-шаблонного способа производства. Искажение профиля в настоящей работе принято характеризовать не линейной величиной, как это традиционно принято, а отклонением нормали в точках контура от теоретического положения, функционально зависящим от линейного искажения и изменения пространственного положения контура. Это делает предложенный метод одинаково пригодным для контроля не только искажений профиля, но и вписываемости агрегатов в общий контур, заклинения, углов установки, поперечного  $V$  крыла и т.д. В ряде случаев метод может быть упрощен за счет исключения необходимости расчета линии отражения и изготовления шаблона, т.к. местное искажение удастся визуализировать и оценить по искажению линии отражения в ортогональном к ней направлении. Последнее достигается поворотом линии отражения в области намеченной для контроля точки поверхности до тех пор, пока ее искажение станет максимальным.

К достоинствам метода следует отнести высокую наглядность результатов контроля, возможность одновременного контроля значительных участков поверхности, дешево-визу средств контроля.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ.

Рассмотрим первоначально способ расчета формы линии отражения на примере линейчатой поверхности — крыла без геометрической кривки<sup>+)</sup>.

Пусть поверхность крыла задана табличным способом через координаты однопроцентных точек на корневом и концевом сечениях и известно направление единичного вектора нормали  $N(\ell, m, n)$  к поверхности для каждой из образующих крыла, проходящих через данные

<sup>+) Предложен А.В.Мощанским.</sup>

однопроцентные точки. Положение шелевого источника (рис. 1) задано координатами точек  $A(x_A, y_A, z_A)$  и  $B(x_B, y_B, z_B)$ . Фотокамера расположена в точке  $O$  с известными координатами.

Если через точку  $C$  на образующей  $EF$  проходит линия отражения  $ab$  отрезка  $AB$ , то это означает, что падающий луч  $DC$  и отраженный  $CO$  лежат в одной плоскости с нормалью  $N$ , и нормаль делит угол  $OSD$  пополам. Представим, что касательная плоскость  $P$ , проведенная через образующую  $EF$ , зеркальна. Тогда мнимым изображением отрезка  $AB$  будет отрезок  $A'B'$ . Через три точки  $O, E, F$  проведем плоскость  $\xi$ . Прямая  $A'B'$  пересечет плоскость в точке  $D'$ . Проведем из точки  $O$  в точку  $D'$  прямую  $OD'$ . Она пересечет линию  $EF$  в точке  $C$ . Координаты точки  $C$  находятся из условия пересечения линий  $EF$  и  $OD'$ .

Переходя к следующей образующей и выполнив те же вычисления, находим вторую точку  $C_1$  линии отражения и т.д. Соединяя полученные точки плавной кривой, получаем линию отражения источника  $ab$  на поверхности. Фотокамера осуществляет центральную проекцию этой линии на плоскость экрана. Задав направление оси фотокамеры, можно рассчитать форму линии отражения на экране фотокамеры и вычертить шаблон, используемый для контроля. Для расчета формы линии отражения запишем уравнение источника  $AB$  как линии, проходящей через две известные точки

$$\frac{x - x_A}{x_B - x_A} = \frac{y - y_A}{y_B - y_A} = \frac{z - z_A}{z_B - z_A} \quad (1)$$

Аналогично уравнение образующей  $EF$  имеет вид

$$\frac{x - x_E}{x_F - x_E} = \frac{y - y_E}{y_F - y_E} = \frac{z - z_E}{z_F - z_E} \quad (2)$$

Уравнение касательной плоскости  $P$  запишем как уравнение плоскости, проходящей через точку  $E$  перпендикулярно вектору  $N(l, m, n)$

$$lx + my + nz + D = 0, \quad (3)$$

где

$$D = lx_E + my_E + nz_E$$

Определим теперь координаты точек  $A'$  и  $B'$ .  
Для этого найдем расстояния  $AK$  и  $BK$ , от точек  $A$  и  $B$  до плоскости  $P$ .

$$\begin{aligned} h_A &= lx_A + my_A + nz_A + D \\ h_B &= lx_B + my_B + nz_B + D \end{aligned} \quad (4)$$

Поскольку точки  $A$  и  $A'$ ,  $B$  и  $B'$  симметричны относительно плоскости, координаты  $A'$  и  $B'$  находятся по следующим формулам

$$\begin{aligned} x'_A &= x_A - 2h_A \cdot l & x'_B &= x_B - 2h_B \cdot l \\ y'_A &= y_A - 2h_A \cdot m & y'_B &= y_B - 2h_B \cdot m \\ z'_A &= z_A - 2h_A \cdot n & z'_B &= z_B - 2h_B \cdot n \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем уравнение плоскости, проходящей через три точки  $O, E, F$ , и уравнение прямой  $A'B'$  и из совместного их решения определим координаты точки пересечения  $D'(x'_D, y'_D, z'_D)$

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{vmatrix} x - x_0 & y - y_0 & z - z_0 \\ x_E - x_0 & y_E - y_0 & z_E - z_0 \\ x_F - x_0 & y_F - y_0 & z_F - z_0 \end{vmatrix} = 0 \\ \frac{x - x'_A}{x'_B - x_A} = \frac{y - y'_A}{y'_B - y'_A} = \frac{z - z'_A}{z'_B - z'_A} \end{array} \right. \quad (6)$$

Проверим, лежит ли точка  $D'$  на отрезке  $A'B'$ , т.е. выполняется ли условие

$$\begin{aligned} X'_A < X'_{D'} < X'_B & , \text{ если } X'_A < X'_B \quad \text{или} \\ X'_A > X'_{D'} > X'_B & , \text{ если } X'_A > X'_B . \end{aligned} \quad (7)$$

Если это условие не соблюдено, то линия отражения не проходит через образующую  $EF$  из-за недостаточной длины отрезка  $AB$ .

При выполнении условия (7) запишем уравнения прямых  $OD'$  и  $EF$  и из совместного их решения найдем координаты точки  $C(X_C, Y_C, Z_C)$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{X - X_E}{X_F - X_E} &= \frac{Y - Y_E}{Y_F - Y_E} = \frac{Z - Z_E}{Z_F - Z_E} \\ \frac{X - X_0}{X_{D'} - X_0} &= \frac{Y - Y_0}{Y_{D'} - Y_0} = \frac{Z - Z_0}{Z_{D'} - Z_0} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Проверим, лежит ли точка  $C$  на отрезке  $EF$ , т.е. выполняется ли условие:

$$\begin{aligned} X_E < X_C < X_F & , \text{ если } X_E < X_F \quad \text{или} \\ X_E > X_C > X_F & , \text{ если } X_E > X_F . \end{aligned} \quad (9)$$

Если это условие не соблюдено, линия отражения не проходит через отрезок  $EF$  из-за недостаточной его длины.

Рассмотрим более сложный случай линейчатой поверхности, когда имеет место геометрическая крутка, т.е. направление нормали  $N$  вдоль образующей не остается постоянным, а по мере движения от точки  $E$  к точке  $F$  нормаль поворачивается вокруг линии  $EF$  как оси. При этом нормаль остается перпендикулярной  $EF$ .

Перейдем к новой системе координат  $X_1, Y_1, Z_1$  (рис.2), в которой ось  $Z_1$  направлена вдоль образующей, ось  $Y_1$  совпадает с направлением нормали в точке  $E$ , а ось  $X_1$  направлена так, чтобы образовался левый орт.



Пусть координаты точек  $O, A, B, E, F$  заданы в системе координат  $X, Y, Z$ .

Направляющие косинусы единичного вектора нормали равны соответственно

$$\begin{aligned} \ell &= \cos(90^\circ - \alpha) = \sin \alpha, \\ m &= \cos \alpha, \\ n &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Ограничимся рассмотрением наиболее распространенного частного случая. Примем, что крутка на участке  $EF$  незначительна, так что  $\sin \alpha \approx \alpha$ ,  $\cos \alpha \approx 1$ .

Пусть задана функция угла крутки  $\alpha = f(z)$ . Тогда направляющие косинусы примут вид  $\ell = f(z)$ ,

$$m = 1, \quad n = 0$$

Определим расстояние от точек  $A$  и  $B$  до касательной плоскости в точке образующей с координатой  $z$ ,

$$\begin{aligned} h_A &= x_A f(z) + y_A + [x_E f(z) + y_E] \\ h_B &= x_B f(z) + y_B + [x_E f(z) + y_E], \end{aligned} \quad (11)$$

где  $x_{A_1}, y_{A_1}, x_{B_1}, y_{B_1}, x_E, y_E$  координаты точек  $A, B, E$  в системе координат  $x, y, z$ , а выражение в квадратных скобках определяет коэффициент  $D$  согласно (3).

(б) Находим координаты точек  $A'$  и  $B'$  по формулам

$$\begin{aligned} x'_{A_1} &= x_{A_1} + 2h_A \cdot f(z) & x'_{B_1} &= x_{B_1} + 2h_A \cdot f(z) \\ y'_{A_1} &= y_{A_1} + 2h_A & y'_{B_1} &= y_{B_1} + 2h_A \\ z'_{A_1} &= z_{A_1} & z'_{B_1} &= z_{B_1} \end{aligned}$$

После преобразований формулы примут вид

$$\begin{aligned}
 x'_{A_1} &= \alpha f^2(z_1) + \beta f(z_1) + x_{A_1} & x'_{B_1} &= \alpha f^2(z_1) + \beta f(z_1) + x_{B_1} \\
 y'_{A_1} &= d f(z_1) + y_{A_1} & y'_{B_1} &= d f(z_1) + y_{B_1} \\
 z'_{A_1} &= z_{A_1} & z'_{B_1} &= z_{B_1}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

Запишем уравнение для  $A'B'$  и  $OC$  как прямых линий, проходящей через две точки. С учетом (5) имеем

$$\frac{x_i - x'_{A_1}}{x'_{B_1} - x'_{A_1}} = \frac{y_i - y'_{A_1}}{y'_{B_1} - y'_{A_1}} = \frac{z_i - z'_{A_1}}{z'_{B_1} - z'_{A_1}} \tag{13}$$

$$\frac{x_i - x_{O1}}{-x_{O1}} = \frac{y_i - y_{O1}}{-y_{O1}} = \frac{z_i - z_{O1}}{z_1 - z_{O1}} \tag{14}$$

Если линия отражения проходит через точку  $C$ , то прямые  $OC$  и  $A'B'$  пересекаются. Условие пересечения этих прямых можно записать в виде:

$$\begin{vmatrix}
 x_0 - x'_{A_1} & y_0 - y'_{A_1} & z_0 - z'_{A_1} \\
 x'_{B_1} - x'_{A_1} & y'_{B_1} - y'_{A_1} & z'_{B_1} - z'_{A_1} \\
 -x_{O1} & -y_{O1} & z_1 - z_{O1}
 \end{vmatrix} = 0 \tag{15}$$

Вид уравнения (15) зависит от вида функции  $f(z_1)$ . Если  $f(z_1)$  является линейной функцией, то (15) представляет собой уравнение третьей степени относительно  $z_1$ .

Найдя  $z_1$  из уравнения (15), определим, принадлежит ли точка  $C$  отрезку  $EF$ , используя (9). Затем находим координаты точки  $D'$  пересечения  $OC$  и  $A'B'$  и проверяем принадлежность точки  $D'$  отрезку  $A'B'$  по условию (7).

Если уравнение (15) не имеет решения или не выполняется одно из условий (9) и (7), то через образующую  $EF$  линия отражения не проходит, и следует перейти

к следующей образующей. При этом следует сделать вновь замену координат, приведя их, как сказано выше, к выбранной образующей.

При решении задач в случае произвольных поверхностей следует руководствоваться следующим алгоритмом. Выделить на поверхности опорные линии, на которых предполагается искать точки  $C$  пересечения с линией отражения. Опорные линии могут быть заданы аналитически или отдельными достаточно часто расположенными точками. Задавая на опорной линии произвольную точку  $C^*$ , написать уравнение прямой  $OC^*$  и мнимого изображения  $A'B'$ , имея в виду, что положение мнимого изображения определяется положением касательной плоскости в точке  $C^*$ .

Пусть уравнения имеют вид

$$\frac{x - x_0}{x_1} = \frac{y - y_0}{y_1} = \frac{z - z_0}{z_1}$$

$$\frac{x - x'_A}{x_2} = \frac{y - y'_A}{y_2} = \frac{z - z'_A}{z_2}$$

Определить кратчайшее расстояние  $h$  между прямыми по формуле

$$h = \frac{\begin{vmatrix} x'_A - x_0 & y'_A - y_0 & z'_A - z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}}{\sqrt{\left| \frac{y_1 z_1}{y_2 z_2} \right|^2 + \left| \frac{z_1 x_1}{z_2 x_2} \right|^2 + \left| \frac{x_1 y_1}{x_2 y_2} \right|^2}} \quad (16)$$

Если прямые пересекаются, что является необходимым условием существования точки  $C$  на опорной линии, то  $h = 0$ . Поэтому перебором точек  $C^*$  установить направление движения вдоль опорной линии, при котором расстояние  $h$  уменьшается. В районе точки опорной линии, где расстояние достигнет минимума и при дальнейшем движении в установленном направлении начнет увеличиваться, необходимо уменьшить шаг итера-

ции и, сужая район поиска, найти точку  $C$  из условия  $h=0$ . Затем найти координаты точки  $D'$  и  $u$ , используя условие (7), убедиться в принадлежности точки отрезку  $A'B'$ , после чего перейти к следующей опорной линии.

Рассчитав тем или иным способом линию отражения от теоретической поверхности, задаем далее допустимые отклонения нормали в точках поверхности на линии отражения и считая, что в ближайшей окрестности каждой точки вдоль опорной линии направление нормали остается или неизменным или изменилось так же, как и в точке на линии отражения, производим расчет допустимой линии отражения.

На контрольный шаблон рядом с теоретическими наносятся допустимые линии отражения.

Контроль осуществляется следующим образом. В стенд, где положение источников света и фотокамеры зафиксировано, помещается контролируемая поверхность. На матовый экран фотокамеры накладываается контрольный шаблон, выполненный на прозрачной основе, и проверяется положение фактической линии отражения относительно теоретической и допустимых. При необходимости шаблон может быть наложен на фотопленку и произведена фоторегистрация результатов контроля.

Рассмотрим влияние искажения формы поверхности на искажение линии отражения.

Искажение формы поверхности изменяет положение касательной плоскости. Оценим влияние поворота касательной плоскости как зеркала на положение мнимого изображения (рис. 3).

Пусть поворот касательной плоскости  $P$  на угол  $\alpha$  происходит вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа и проходящей через точку  $S$ , так что после поворота она займет положение  $P_1$ . Найдем положения мнимых изображений  $u'$  и  $u''$  до и после поворота, и определим траекторию  $u'u''$ . Поскольку  $Su = Su' = Su'' = R$ , то мнимое изображение при повороте касательной плоскости перемещается по дуге окружности радиуса  $R$  с центром в точке поворота. Поскольку  $\angle u'u'' = \alpha$ , то центральный угол, опирающийся на дугу  $\cup u'u''$  равен  $2\alpha$ .

В общем случае при повороте вокруг некоторой оси касательной плоскости как зеркала на угол  $\alpha$  мнимое изображение каждой точки предмета описывает в плоскости, перпендикулярной оси поворота касательной плоскости, дугу окружности с центром на оси поворота. Определим проекции дуги  $\cup u' u''$  на оси координат  $x, y$

$$x u' = SK = a$$

$$x u'' = R \cdot \cos(2\alpha + \beta) = R(\cos\beta \cdot \cos 2\alpha - \sin\beta \cdot \sin 2\alpha)$$

$$\cos\beta = \frac{a}{R} \quad \sin\beta = \frac{\sqrt{R^2 - a^2}}{R} = \frac{H_u}{R} \quad (17)$$

В силу малости  $\alpha$   $\cos 2\alpha = 1$   $\sin 2\alpha = 2\alpha$

$$(u' u'')_x = x u' - x u'' = a - R \left( \frac{a}{R} - 2\alpha \frac{H_u}{R} \right) = 2\alpha \cdot H_u$$

Аналогично, откуда  $y u' = R \cdot \sin\beta$ ,  $y u'' = R \sin(\beta + 2\alpha)$ ,

$$(u' u'')_y = 2\alpha \cdot a$$

Поскольку  $a = \frac{H_u \cdot L}{H_u - H_{\text{наб}}}$ , то

$$(u' u'')_y = 2\alpha \frac{H_u \cdot L}{H_u + H_{\text{наб}}} = (u' u'')_x \cdot \text{ctg } \beta \quad (18)$$

Таким образом, перемещение мнимого изображения можно представить двумя отрезками: параллельным касательной плоскости и перпендикулярным ей.

Найдем перемещение точки отражения в предположении, что участок поверхности, прилегающей к точке  $S$  аппроксимируется элементарной площадкой касательной плоскости (рис. 4). Перемещения  $h$  и  $\Delta h$  определим отдельно за счет каждой из составляющих перемещения мнимого изображения.

Из подобия  $\Delta OS, S$  и  $\Delta O D, U'$  следует  
 $\frac{OS}{h} = \frac{OU'}{(u' u'')_x}$  . Т.е.  $OS = \frac{H_{\text{наб}}}{\sin\beta}$  , а  $OU' = \frac{H_{\text{наб}} + H_u}{\sin\beta}$   
 то  $h = \frac{H_{\text{наб}}}{H_u + H_{\text{наб}}} (u' u'')_x$  или  $h = 2\alpha \cdot \frac{H_{\text{наб}} \cdot H_u}{H_{\text{наб}} + H_u}$  (19)

Из (19) следует, что для повышения разрешающей способности метода нужно стремиться к увеличению высоты источников света и точки наблюдения над контролируемой поверхностью.

Зависимость (19) представлена на номограмме (рис. 5).

Для оценочного расчета  $\Delta h$  примем следующие допущения:  $OD = OU'$  и  $\angle OS_2M = \angle OSS_2 = \beta$ , что не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на величину  $\Delta h$ .

Из подобия  $\triangle ODU''$  и  $\triangle OS_1A$  следует

$$S_1A = \frac{H_{\text{наб.}}}{H_{\text{наб.}} + H_u} (u'u'')_y$$

Из прямоугольного  $\triangle S_2S_1A$  следует  $\Delta h = S_2S_1 = S_1A \operatorname{ctg} \beta$   
Из  $\triangle NSU'$

$$\operatorname{ctg} \beta = \frac{a}{H_u} = \frac{L}{H_u + H_{\text{наб.}}}$$

Отсюда

$$S_2S_1 = \frac{H_{\text{наб.}}}{H_{\text{наб.}} + H_u} \cdot 2a \cdot \frac{H_u \cdot L}{H_u + H_{\text{наб.}}} \cdot \frac{L}{H_u + H_{\text{наб.}}}$$

Окончательно

$$\Delta h = 2a \frac{H_{\text{наб.}} \cdot H_u}{H_{\text{наб.}} + H_u} \cdot \frac{L^2}{(H_{\text{наб.}} + H_u)^2} = h \left( \frac{L}{H_u + H_{\text{наб.}}} \right)^2 = (20)$$

$$= h \cdot \operatorname{ctg}^2 \beta.$$

Таким образом, перемещение  $\Delta h$  прямопропорционально квадрату отношения расстояния между точкой наблюдения и источником  $L$  к сумме высот источника и точки наблюдения над касательной плоскостью.

При углах  $\beta \geq 70^\circ$  перемещение  $\Delta h$  не превышает 15%  $h$ , в силу чего им можно пренебречь.

Рассмотрим более общий случай перемещения точки отражения на касательной плоскости  $P$  в зависимости от различных азимутных положений точек наблюдения.

Пусть остальные условия останутся неизменными, т.е. поворот нормали происходит на один и тот же угол каждый

раз в одной и той же плоскости, а источник света и точка наблюдения находится на постоянной высоте над плоскостью первоначально и независимо от положения точки наблюдения источник наблюдается в точке  $S$ . Чтобы соблюсти последнее условие, необходимо перемещать точку наблюдения и мнимое изображение источника света по круговым коническим поверхностям с вершиной в точке  $S$  и осями, совпадающими с направлением нормали в  $S$  точке (рис. 6).

Пусть нормаль повернулась на угол  $\alpha$  по часовой стрелке вокруг оси 1-1, лежащей в плоскости  $P$ . Выберем оси координат следующим образом: ось  $X$  - перпендикулярно оси 1-1 в плоскости  $P$ , ось  $Y$  - вдоль оси 1-1 ось  $Z$  - перпендикулярно плоскости (рис. 7). Положение мнимого изображения будем характеризовать азимутным углом  $\psi$ , отсчитываемым от положительного направления оси  $X$ . Мнимое изображение в результате поворота нормали переместилось согласно (17) и (18) на величину  $\Delta X = 2\alpha \cdot H \sin \beta$  параллельно оси  $X$  и на величину  $\Delta Z = \Delta X \cdot \operatorname{ctg} \beta$  параллельно оси  $Z$ . При этом для точек наблюдения, расположенных справа от оси  $Y$  (рис. 7), что соответствует значениям  $-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$ ,  $\Delta Z > 0$ , т.е. мнимое изображение приближается к плоскости, а для точек слева от оси  $\Delta Z < 0$ , т.е. мнимое изображение отдаляется от плоскости. При перемещении вдоль оси  $\Delta X$  мнимое изображение удаляется от точки  $O$  вдоль оси  $X$  при  $-90^\circ < \psi < 90^\circ$  или приближается к ней при  $90^\circ < \psi < 270^\circ$ . Пренебрежем пока величиной вертикального перемещения мнимого изображения источника. Тогда нижнее основание конуса как бы смещается на величину  $U'D = \Delta X$ . Благодаря этому точка отражения  $S$  переместится в точку  $S_1$ . Докажем, что для всех положений точки наблюдения это смещение одно и то же.

Рассмотрим  $\Delta OU'D$  и  $\Delta OS_1S$ . Поскольку  $U'D \parallel \text{пл. } P$ , то линии  $SS_1$  и  $U'D$  непараллельные. Поскольку  $SS_1$  и  $U'D$  лежат в одной плоскости  $OU'D$ , то они и нескрещивающиеся. Следовательно, они параллельны.  $\Delta OU'D$  и  $\Delta OS_1S$  подобны.

Отсюда

$$SS_1 = O'D \frac{OS}{OU'}$$

Если теперь рассмотрим любую другую пару таких треугольников (при других положениях точки наблюдения и мнимого изображения), то обнаружим, что в каждом из них  $S_1 S_1 U' D$ , а так как отрезки  $OS$  и  $OU'$  всегда равны, то  $SS_1$  также равны. Таким образом, точка  $S_1$  общая для всех пар треугольников. Следовательно, независимо от положения точки наблюдения, точка отражения  $S$  перемещается в плоскости поворота нормали на одну и ту же величину  $SS_1 = h$ . Учтем теперь влияние вертикального перемещения  $DU'' = \Delta Z$  (рис. 8). Центральная проекция отрезка  $S_1 A$  на плоскость  $P$  равна  $S_1 S_2 = \Delta h$ , как это показано при выводе (20). В зависимости от азимута  $\psi$  отрезок  $S_1 S_2$  по разному располагается относительно  $SS_1$ .

При  $\psi = 0$  или  $\psi = 180^\circ$   $S_1 S_2$  является продолжением отрезка  $SS_1$ , а при  $\psi = 90^\circ$  или  $\psi = 270^\circ$   $S_1 S_2 \perp SS_1$ , т.е.  $S_1 S_2$  наклонен под углом  $\psi$  к  $SS_1$ . Положение отрезка  $S_1 S_2$  в области углов  $-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$  такое же, как и в области  $90^\circ < \psi < 270^\circ$ , когда углы в этих областях отличаются на  $180^\circ$ .

Общее перемещение точки отражения  $SS_2$  равно (рис. 8б)

$$SS_2 = h \sqrt{1 + \operatorname{ctg}^4 \beta + 2 \operatorname{ctg}^2 \beta \cdot \cos \psi} \quad (21)$$

На рис. 10 построены графики, иллюстрирующие зависимость (21).

Тангенс угла  $\gamma$  между отрезками  $SS_1$  и  $SS_2$  равен

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\operatorname{ctg} \beta \cdot \sin \psi}{\operatorname{ctg}^2 \beta \cdot \cos \psi + 1} \quad (22)$$

При  $\beta \geq 70^\circ$   $\gamma \leq 7^\circ$  при любых  $\psi$ .



Все установленные зависимости выведены без учета влияния перспективных искажений, возникающих при наблюдении отрезка  $SS_2$ . Оценим влияние условий наблюдения при наличии перспективного искажения.

Линия наблюдения (луч  $OU''$ ) наклонена к касательной плоскости под углом  $\beta$  ( $0 < \beta \leq 90^\circ$ ). В зависимости от азимута наблюдения  $\psi$  (рис. 9) меняется не только длина отрезка  $SS_2$ , но и его проекция  $(SS_2)_\beta$  на плоскость  $F$ , перпендикулярную направлению наблюдения. В соответствии с рис. 9.

$$\frac{(SS_2)_\beta}{h} = \sqrt{(\operatorname{ctg}^2 \beta + \cos^2 \psi) \cdot \sin^2 \beta + \sin^2 \psi} \quad (23)$$

На рис. 10 показана зависимость наблюдаемой величины перемещения как функции углов  $\psi$  и  $\beta$ . Анализ графиков показывает, что уменьшение угла  $\beta$  увеличивает воспринимаемую глазом величину перемещения, но и делает ее более зависимой от азимута наблюдения  $\psi$ .

При  $\beta \geq 70^\circ$  длина  $(SS_2)_\beta$  изменяется в зависимости от угла  $\psi$  не более, чем на 8%.

Тангенс угла  $\gamma_\beta$  между отрезками  $(SS_2)_\beta$  и  $(SS_1)_\beta = h_\beta$  равен

$$\operatorname{tg} \gamma_\beta = \operatorname{tg} \psi / \sin \beta \quad (24)$$

Зависимость угла  $\gamma_\beta$  от  $\psi$  и  $\beta$  показана на рис. 11. При  $\beta \geq 70^\circ$   $\gamma_\beta \leq 7^\circ$ .

Сравнение графиков зависимостей (21) и (23) показывает, что перемещение точки отражения  $SS_2$  и ее проекция  $(SS_2)_\beta$  максимальны при  $\psi = 0$  и минимальны при  $\psi = 90^\circ$ .

Если перемещение  $(SS_2)_\beta$  направлено вдоль линии отражения или под небольшим углом к ней, то она искажается мало. Для визуализации перемещения необходимо изменением положения источника света и точки наблюдения  $O$  добиться, чтобы линия отражения проходила через намеченную для контроля точку поверхности  $S$

и имела в этой точке наибольшее из всех возможных искажение.

При изменении положения линии отражения перемещение точки наблюдения изменяет азимутный угол  $\psi$ . В силу этого линия отражения искажается одновременно как за счет роста  $(SS_2)\beta$  при уменьшении  $\psi$ , так и за счет изменения положения  $(SS_2)\beta$  относительно теоретической линии отражения. Как следует из рис. 10  $(SS_2)\beta$  даже при небольших углах  $\beta$  изменяется незначительно, а при углах наблюдения  $\beta \geq 70^\circ$   $(SS_2)\beta$  практически не зависит от азимута  $\psi$ . Поэтому для визуализации перемещения точки отражения достаточно осуществить вращение источника света вокруг точки И, наблюдаемой в точке S поверхности (рис. 12). Тем самым будет обеспечено вращение линии отражения вокруг точки S. Величина искажения линии отражения измеряется при достижении максимума.

При использовании для визуализации перемещения линии отражения, когда ее положение задано и не может быть изменено, перемещение  $(SS_2)\beta$  может занимать любое положение по отношению к линии в зависимости от того, в какую сторону повернулась нормаль из-за искажения поверхности. Но как бы ни было направлено перемещение  $(SS_2)\beta$  линия отражения искажается за счет ортогональной проекции  $(SS_2)\beta$ .

Если использовать для контроля две взаимноперпендикулярные в точке S линии отражения (рис. 13), то измерив искажения каждой из линий отражения  $(SS_2)\beta_{1-1}$  и  $(SS_2)\beta_{2-2}$ , величину  $(SS_2)\beta$  можно найти по формуле:

$$(SS_2)\beta = \sqrt{(SS_2)\beta_{1-1}^2 + (SS_2)\beta_{2-2}^2} \quad (25)$$

Если поверхность имеет только небольшие местные искажения формы, то для осуществления контроля нет необходимости производить расчет теоретической линии отражения. Теоретическая линия легко может быть получена сглаживанием фактической линии отражения. Например, при искажении типа волнистости поверхности, линия

отражения также волниста, и ее теоретическая форма восстанавливается проведением линии через середины гребешков. В точках пересечения фактической линии отражения с теоретической нормаль к поверхности совпадает с теоретическим направлением, т.е. поверхность в этих точках не искажена или ее точки эквидистантно смещены относительно теоретического профиля.

Наметив на поверхности точку для контроля, поворотом источника света, переносом точки наблюдения или совместным перемещением источника света и точки наблюдения следует добиться прохождением через эту точку линии отражения так, чтобы она имела максимальное искажение в ортогональном направлении. Измерить искажение  $(SS_2)_\beta$  можно непосредственно на экране фотокамеры или на фотографии с учетом масштаба фотографирования.

Зная угол  $\beta$ , по графику (рис. 11) определим величину отношения  $(SS_2)_\beta$ , а по ней  $h$ . Затем по номограмме (рис. 5), зная высоты  $H_{наб.}$  и  $H_u$ , находится угол  $\alpha$  поворота нормали в контролируемой точке поверхности.

Часто местные искажения имеют регулярный характер, например, искажения в виде волнистости, и бывает известно направление волнистости, а значит, известно направление  $h_\beta$ . В этом случае нет необходимости добиваться максимального искажения линии отражения. Достаточно повернуть линию отражения так, чтобы искажение хорошо проявилось. На фотографии отметим направление  $h_\beta$ , по графику на рис. 11 для известных  $\beta$  и  $\psi$  найдем угол  $\beta_\beta$  и отмечаем направление  $(SS_2)_\beta$ . Затем определяем величину искажения линии отражения в ортогональном направлении, проектируем это искажение на направление  $(SS_2)_\beta$ , и таким образом находим  $(SS_2)_\beta$ , после чего повторяется процедура, описанная выше.

Оценим влияние систематических ошибок в измерении высоты  $H_{наб.}$  и  $H_u$ ,  $h$  на ошибку  $\Delta\alpha$  в определении угла  $\alpha$

$$\Delta\alpha = \frac{\partial\alpha}{\partial H_{наб.}} \cdot \Delta H_{наб.} + \frac{\partial\alpha}{\partial H_u} \cdot \Delta H_u + \frac{\partial\alpha}{\partial h} \Delta h$$

Поскольку формула (19) рекуррентна относительно  $H_{\text{над}}$  и  $H_{\text{ц}}$ , два первых члена суммируются, так что

$$\Delta \alpha = 2 \frac{\partial \alpha}{\partial H_{\text{над}}} \cdot \Delta H_{\text{над}} + \frac{\partial \alpha}{\partial h} \cdot \Delta h$$

После дифференцирования и подстановки имеем

$$\Delta \alpha = h \cdot \frac{1}{H^2} \Delta H + \frac{1}{H} \Delta h = \frac{h}{H^2} \cdot a H + \frac{1}{H} \beta H = \quad (28)$$

$$= \frac{h}{H} (a + \beta),$$

где  $a$  и  $\beta$  относительные ошибки в определении  $H$  и  $h$ .

На практике при самых грубых измерениях

$$a \leq 0,1$$

$$0,1 \leq \beta \leq 0,4$$

Зависимость (28) представлена графиками на рис. 14.

Для повышения точности метода следует стремиться к увеличению высоты источника и точки наблюдения над поверхностью, поскольку при этом уменьшаются величины  $a$  и  $\beta$ .

Относительная ошибка  $\frac{\Delta \alpha}{\alpha}$  в диапазоне  $400 \leq H \leq 1000$  мм при тех же условиях измерения представлена на рис. 15.

При этом величина  $\alpha$  найдена по номограмме рис. 5 для  $400 \leq H \leq 1000$  мм.

## 2. Экспериментальная проверка метода

Экспериментальное определение отражающей способности поверхности показало, что при нанесенном на анодированный лист лакокрасочном покрытии и использовании светящейся сетки имеет место зеркальное отражение, позволяющее получить хорошее изображение отдельных щелевых источников, помещенных на высоте  $1000 + 1200$  мм над поверхностью (рис. 16). Аналогичными качествами обладают плакированные листы обшивки. При отсутствии лакокрасочного покрытия наблюдается полудиффузное отражение, т.е. диффузное отражение в направлении, пер-

пендикулярном продольным рискам листа обшивки, и зеркальное отражение в направлении вдоль рисок (рис. 17). На рисунке отчетливо видны продольные риски, возникающие при изготовлении листов в результате чего образуется блик от точечного источника света, отражающегося в поверхности.

Отражающая способность поверхности резко улучшается, если ее покрыть тонким слоем маслянистой жидкости, например, спиртоглицериновой смесью, гидравлической жидкостью, раствором трансформаторного масла в керосине и т.д. (рис. 18). Покрытие поверхности производится с помощью тампона или пульверизатором. Вязкость жидкости подбирается экспериментально и должна обеспечивать хорошую растекаемость жидкости. Время сохранения пленки жидкости на контролируемой поверхности должно быть не менее 15–20 мин. Использование жидкости АМГ–10, например, обеспечивает зеркальность поверхности в течение часа, что более чем достаточно для проведения контроля.

Апробирование алгоритма произведено на примере расчета формы линии отражения от панели изделия. Размеры панели в плане 1665 x 570 мм. Теоретический профиль панели задан табличным способом.

Таблица 1

Координаты профиля	Номер образующей												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
X	259	216	173	130	87	43	0	43	87	130	173	216	259
Y	0	9	18	25	31	36	40	42	43	41	37	29	19

Плоскость хорд панели установлена параллельно координатной плоскости  $XZ$  на высоте 177 мм.

Источник света длиной 1200 мм установлен на высоте 742 мм и имеет координаты точек: А (600, 742, 1583).

В (248, 742, 735). фотокамера установлена в точке О (0,1240, 280).

Панель представляет собой цилиндрическую поверхность. Построим графически ее профиль и найдем положение касательных в точках профиля, вычислим направляющие косинусы перпендикуляра к касательным. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Номер образующей	Направляющие косинусы нормали		
	$\xi$	$\eta$	$\pi$
3	0,1754	0,9845	0
4	0,1484	0,9889	0
5	0,1193	0,9928	0
6	0,080	0,9968	0
7	0,0623	0,9980	0
8	0,0334	0,9995	0
9	0	1	0
10	0,0733	0,9974	0
11	0,1521	0,9884	0
12	0,1962	0	0

Покажем последовательность расчета положения точки С на седьмой образующей. Перенесем начало координат в точку 7 профиля, назовем эту точку точкой Е.

Тогда координаты точек запишутся

А (-600, 525, 1583) В (248, 525, 735)

Е (0, 0, 0) О (0, 1023, 280)

Координаты искомой точки С на седьмой образующей

С (0, 0,  $z_c$ )

Уравнение касательной плоскости для седьмой образующей имеет вид

$$0,0623x + 0,9980y = 0$$

Расстояние от точек  $A$  и  $B$  до касательной плоскости

$$h_{A_7} = 0,0623(-600) + 0,9980 \cdot 525 = 488 \text{ мм}$$

$$h_{B_7} = 0,0623 \cdot 248 + 0,9980 \cdot 525 = 538 \text{ мм}$$

Координаты точек  $A'_7$  и  $B'_7$

$$x_{A'_7} = -600 - 2 \cdot 488 \cdot 0,0623 = -540 \text{ мм}$$

$$y_{A'_7} = 525 - 2 \cdot 538 \cdot 0,9980 = -445 \text{ мм}$$

$$z_{A'_7} = 1583 \text{ мм} \quad A'_7(-540, -445, 1583)$$

Аналогично находим

$$B'_7(181, -545, 735)$$

Уравнение прямой  $A'_7 B'_7$  имеет вид

$$\frac{x + 540}{721} = \frac{y + 445}{-100} = \frac{z - 1583}{-848}$$

Уравнение  $OC_7$  имеет вид

$$\frac{x}{0} = \frac{y - 1023}{1023} = \frac{z - 280}{z_{C_7} - 280}$$

Запишем условие пересечения линий  $OC_7$  и  $A'_7 B'_7$

$$\left| \begin{array}{ccc|c} -540 & -445 - 1023 & 1583 - 280 & \\ 0 & 0 - 1023 & -280 & \\ 721 & -100 & -848 & \end{array} \right| = 0$$

Решение этого уравнения дает  $z_{C_7} = 760$  мм. Определим координаты точки  $D'_7$  пересечения линий  $OC_7$  и  $A'_7 B'_7$  для чего совместно решим уравнения

$$\frac{x + 540}{721} = \frac{y + 445}{100} = \frac{z - 1583}{848}$$

$$\frac{x}{0} = \frac{y - 1023}{-1023} = \frac{z - 280}{760 - 280}$$

Решение дает  $\gamma_{A_7'} = 520$  мм.

Поскольку  $\gamma_{A_7'} < \gamma_{\Delta_7'} < \gamma_{B_7'}$ , точка  $D_7'$  принадлежит отрезку

Расчет, выполненный для других образующих, дал результаты

Образующая	4	5	6	7	8	9	10	11
Координаты точки $C$ линии отражения ( $z_c$ ) мм	510	590	690	760	810	890	950	1030

Схема размещения источника света и панели при виде в плане показана на рис. 19.

В точке  $C_{11}$  на одиннадцатой образующей наблюдается точка  $D_{11}$  источника света, расположенная на расстоянии 1000 мм от точки  $B$ . В точке  $C_4$  наблюдается точка  $B = D_4$ .

Элементарность физического явления, положенного в основу зеркально-оптического метода, определяет и простоту используемых средств контроля (рис. 20). Поворотная рама 1, на которой закреплены источники света 2 и фотокамера 3, с помощью узла подвески 4 закрепляется на каретке 5, перемещающейся по двум параллельным рельсам 6. Узел подвески расположен на оси симметрии рамы и обеспечивает поворот рамы вокруг вертикальной ( $y$ ) и горизонтальной ( $z$ ) осей. Рама имеет возможность перемещаться вдоль оси  $x$  относительно узла подвески по направляющим 7. Перемещения рамы измеряются отсчетными устройствами, на схеме не показанными. Положение рамы фиксируется стопорами, установленными на рельсах, в узле подвески и на направляющих. Фотокамера имеет возможность перемещаться по направляющим и изменять угол наклона. В качестве источников света могут быть применены люминесцентные лампы, помещенные в футляр с продольной щелью шириной 1-2 мм. Шаг источников света 50-100 мм и может регулироваться.



Источники света закреплены на рамке 8, подвешенной к поворотной раме 1, чем обеспечивается возможность поворота линии отражения. Фотокамера и источники света устанавливаются на высоте 500–1000 мм над контролируемой поверхностью в зависимости от ее зеркальности так, чтобы было видно четкое отражение источников света на экране фотокамеры.

Для нахождения на источнике света точки, наблюдаемой в точке  $S$  поверхности, вдоль источника перемещается марка (9) в виде непрозрачной пластинки шириной 15–20 мм. Привод марки ручной с места оператора (у фотокамеры).

При определении волнистости пологой панели для улучшения ее зеркальности на поверхность нанесена гидросмесь АМГ-10. Для ориентировки на поверхности размечены линии равных процентов. Примем, что фотокамера помещена над седьмой образующей на высоте  $H_{\text{над}} = 1023$  мм, источники света на высоте  $H_{\text{ц}} = 525$  мм. Поверхность панели имеет поперечную волнистость. Точка наблюдения выбрана так, чтобы обеспечить азимут  $\psi = 90^\circ$ .

Контроль произведен при двух положениях источников света относительно панели. В первом случае источники располагались поперек панели, т.е. направление линий отражения практически совпадало с направлением перемещения точек линии отражения из-за волнистости поверхности. В силу этого линия отражения искажается мало. Периодичность волнистости также почти незаметна (рис. 21 а). Если бы заранее не было известно направление  $(SS_2)\beta$ , то такое положение линии отражения, т.е. положение, при котором она имеет наименьшие искажения, показало бы направление перемещения  $(SS)\beta$  (рис. 21 б).

Во втором случае, источники света повернуты по отношению к панели на  $45^\circ$ , как это показано на рис. 19. Линии отражения искажены значительно больше, чем в первом случае (рис. 21 б). Периодичность может быть определена непосредственно по фотографии и составляет  $\sim 25$  мм. Величина искажения вдоль линии отражения, по крайней мере, по визуальной оценке не изменяется. Лишь в крайней левой части, где линия отражения

симметрична по отношению к образующей с линией отражения в первом случае, заметно уменьшение искажения. Для сравнения на рис. 21 а нанесена линия отражения для второго случая.

Определим поворот нормали на образующей № 7. Для этого линию отражения усредним и проведем к ней касательную в точке  $C_7$  (рис. 22). Измерим ортогональное искажение линии отражения на образующей № 7. С учетом масштаба фотографирования (м 1:5) оно равно  $\sim 12$  мм. С помощью подвижной марки, перемещаемой вдоль источника света, определим положение точки источника света, наблюдаемой в точке  $C_7$ . Она расположена на расстоянии  $\sim 190$  мм от точки  $B$  (рис. 19). Развернув плоскость  $OC_7D_7$  на плоскость чертежа определяем угол наблюдения  $\beta_7 = 70^\circ$ . По графикам на рис. 10 и рис. 11 определяем для  $\beta = 70^\circ$  и  $\psi = 90^\circ$   $\frac{(\overline{SS}_2)\beta}{h} = 1$ ,  $\gamma_\beta = 6^\circ$ .

Поскольку фотокамера направлена вдоль седьмой образующей, то направление этой образующей проектируется без искажения. Проекция  $h_\beta$  образует с седьмой образующей угол  $90^\circ \cos(90^\circ - \beta) = 85^\circ$ . Отметим на схеме (рис. 22) направление  $(\overline{SS}_2)\beta$  под углом  $\gamma_\beta$  к  $h_\beta$ . Спроектируем графически ортогональное искажение на направление  $(\overline{SS}_2)\beta$  и найдем тем самым  $(\overline{SS}_2)\beta = 16$  мм.

По номограмме (рис. 5) для  $h = 16$  мм,  $H_{\text{наб.}} = 1023$  мм,  $H_u = 525$  мм находим  $\alpha = 1^\circ 18'$ .

Таким образом, поперечная волнистость поверхности характеризуется периодом  $\sim 25$  мм и углом поворота нормали относительно теоретического положения  $\alpha = 1^\circ 18'$ . В целях иллюстрации метрологических характеристик метода рассмотрим случай контроля плоскостности полированной металлической пластины.

Схема эксперимента показана на рис. 23. Фотоаппарат наклонен к плоскости пластины на угол  $\beta = 70^\circ$ . Над пластиной на высоте  $H_u = 700$  мм помещен растр, образованный щелевыми источниками рассеянного света, установленными с шагом 10 мм.

По трем сечениям пластины  $A, B, B$ , располо-

женным на расстоянии 10 мм друг от друга, произведено измерение профиля впадины с помощью оптической линейки ИС-43. Профили приведены на рис. 24. Фотография наблюдаемых линий отражения представлена на рис. 25. Поперечные риски на пластине нанесены с шагом 15 мм, и пластина установлена так, чтобы линии отражения были параллельны рискам. Искажение линий отражения (отклонение от прямолинейности) характеризуют неплоскостность пластины.

Произведем качественный и количественный анализ картины линий отражения. Теоретическое положение линий отражения неизвестно и не может быть установлено, т.к. пространственное положение пластины и фотокамеры точно не определялось. Поэтому установим лишь изменения профиля впадины относительного сечения, выбранного в качестве эталонного, например, сечения А. По этой же причине не представляется возможным определить восходящий и нисходящий склоны впадины.

Прежде всего картина линий отражения позволяет установить, что метод легко позволяет зарегистрировать отклонения от плоскостности 5-10 мкм на длине 10 мм, что приближает его чувствительность к чувствительности прецизионных измерительных приборов, каковой является оптическая линейка. Размытости линий отражений на некоторых участках, а также образование ими кольцевых зон объясняются тем, что отражения от разных точек поверхности попадают в одну точку. Этот случай характерен для поверхностей с очень небольшими искажениями профиля.

Рассмотрим три линии отражения, помеченные на рис. 25 индексами 1-1, 2-2; 3-3 и проходящими в районе 13, 19, 27 мм от начала впадины.

На линии 1-1 наклон нормали в сечениях Б и В одинаков. Определим разницу в наклонах нормали по линии 1-1 в сечениях А и Б  $\Delta\alpha_{AB}$  и сечениях А и В  $\Delta\alpha'_{AB}$ . Очевидно,  $\Delta\alpha'_{AB} = \Delta\alpha_{AB}$ . Линию отражения на участке между сечениями Б и В примем в качестве теоретической, тогда  $(SS_2)^A = 2$  мм. По графику на рис. 10 для  $\beta = \pi$  и  $\psi = 0$  имеем  $\frac{(SS_2)^B}{h} = 4,1$ .

Отсюда  $h = 2,2$  мм. По номограмме (рис. 5) со входными  $h = 2,2$  мм,  $H_{\text{ног.}} = 920$  мм,  $H_{\text{ц}} = 700$  мм определяем  $\Delta\alpha_{AB}^{1-1} = \Delta\alpha_{AB}^{1-1} = 8'$ .

Вычислим разницу в углах наклона нормалей по линии 1-1 непосредственно по профилям впадины в сечениях А, Б, В.

Для сечения А  $\alpha_A^{1-1} = 1,0'$ , для сечения Б  $\alpha_B^{1-1} = 6'$ , для сечения В  $\alpha_B^{1-1} = 6'$ . Отсюда  $\Delta\alpha_{AB}^{1-1} = \alpha_B^{1-1} - \alpha_A^{1-1} = 5'$ ;  $\Delta\alpha_{AB}^{1-1} = 5'$ .

Сравнительные результаты измерений представлены в таблице

Линия отражения	Разница в углах наклона нормалей, найденная			
	по профилю впадины		по линии отражения	
	$\Delta\alpha_{AB}$	$\Delta\alpha_{AB}$	$\Delta\alpha_{AB}$	$\Delta\alpha_{AB}$
1-1	5'	5'	8'	8'
2-2	4'	10'	4'	8'
3-3	7'	1,5'	8'	2'

Анализ таблицы показывает хорошую сходимость данных. Средняя величина расхождения результатов измерений двумя способами составляет 1,6'.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сейфи Т.Ф., Скворцов Т.П., Гушин В.В., Колесов Б.Н. "Косвенный метод оценки точности измерений при nivelировке самолета в сборочном цехе. "Стандарты и качество", 1969. № 4, с. 46.
2. Докунина Н.И. Методы и средства контроля геометрических параметров в самолетостроении. М., Оборонгиз, 1959, 131 с.
3. Технологические методы и средства контроля качества в самолетостроении. Под ред. И.М.Дунаева. М., "Машиностроение", 1973, 448 с.
4. Сейфи Т.Ф., Скворцов Т.П., Гушин В.В., Колесов Б.Н. Опыт применения статистических методов при путевой балансировке самолета. "Стандарты и качество", 1969. № 6, стр. 49.
5. Сухарев И.П., Ушманков Б.Н. Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. М., Машиностроение", 1969. 207 с.
6. Теокарис П. Муаровые полосы при исследовании деформаций. М., "Мир", 1972, 334 с.
7. Справочник по производственному контролю в машиностроении. Под ред. А.К.Кутая. Л., "Машиностроение", 1974. 676 с.
8. Миннарт М. Свет и цвет в природе. М., Физматгиз, 1958. 424 с.
9. Колесов Б.Н. Контроль формы поверхности двойной кривизны. В кн. "Тезисы докладов на П. Всес. семинаре по геометр. методам исслед. деформаций", Челябинск, 1975. 123-124 с.
10. Б474130 Колесов Б.Н. "Разработка и экспериментальное апробирование метода бесконтактного контроля плавности и волнистости внешней поверхности крупногабаритных изделий". (заключительный этап, 73 с.).
11. Б474132 Колесов Б.Н. "Разработка и экспериментальное апробирование метода бесконтактного контроля плавности и волнистости внешней поверхности крупногабаритных изделий" (этап 2, теоретическая часть, 148 с.).

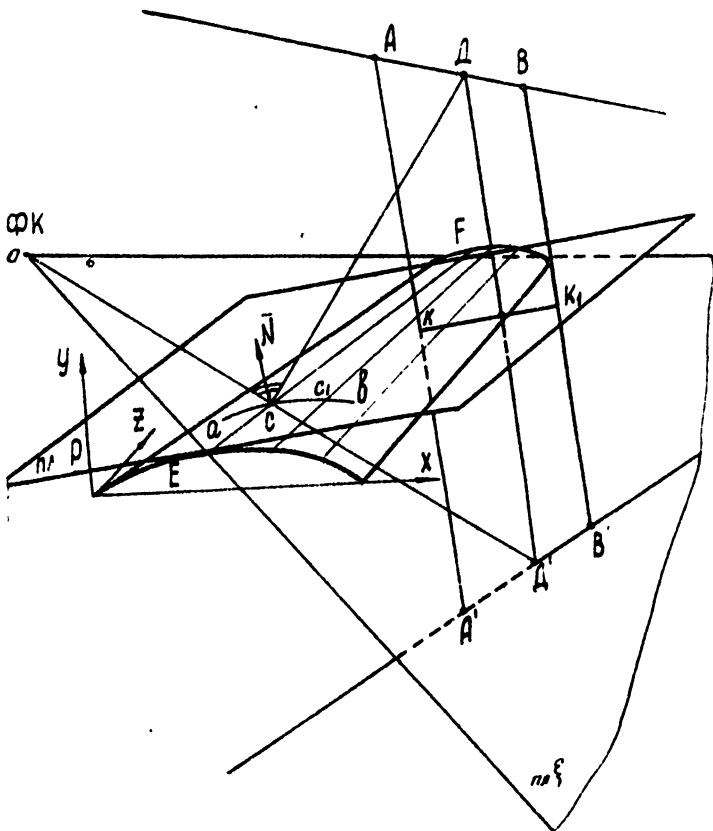


Рис. 1

Схема хода лучей при зеркальном отражении

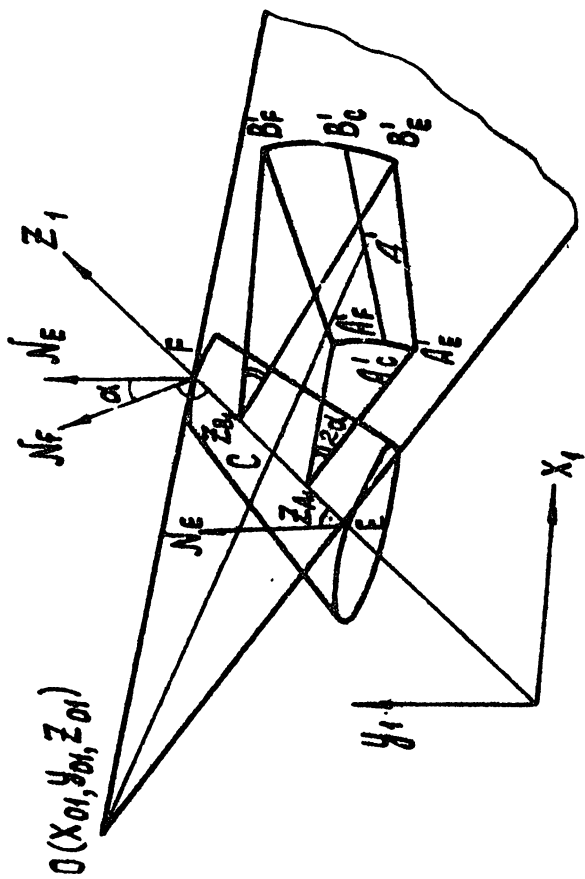


Рис. 2

Скользкая система координат при расчете формы линии отражения в линейчатой поверхности с геометрической кривой

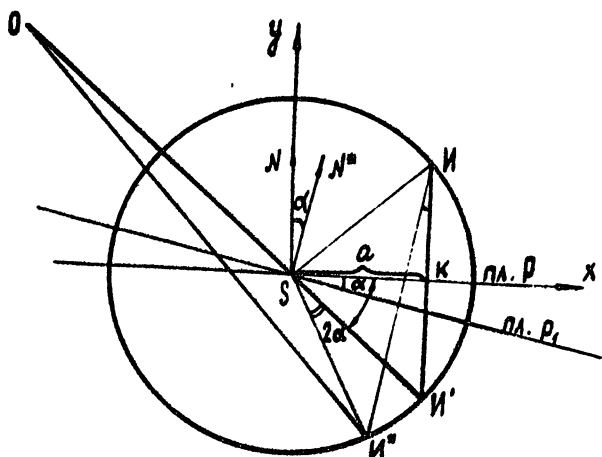


Рис. 3

Смещение мнимого изображения при повороте нормали

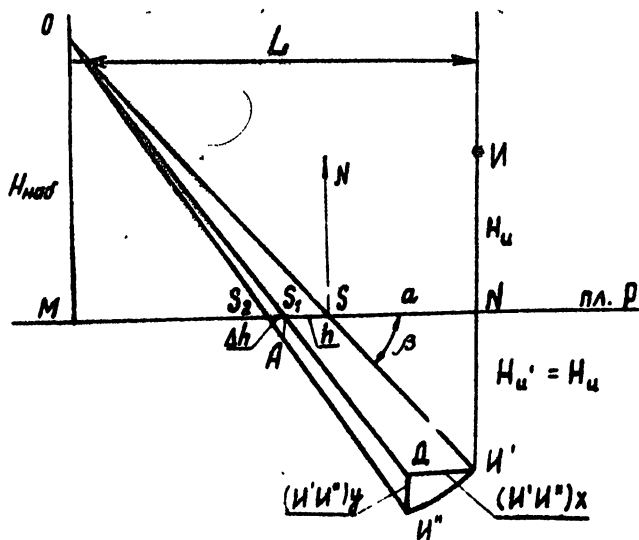


Рис. 4

Смещение точки отражения при искажении формы поверхности



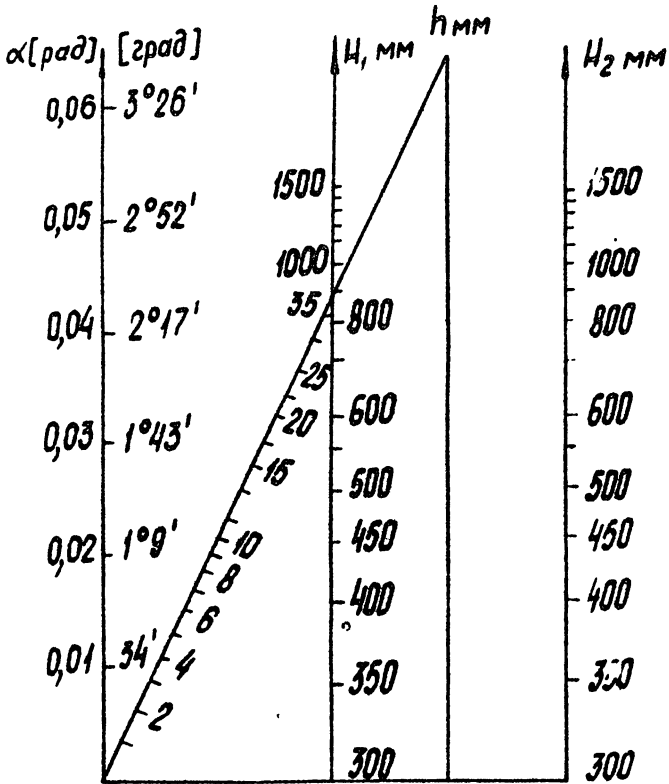
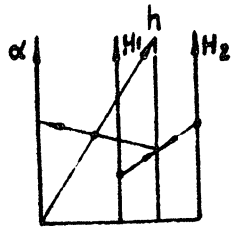


Рис. 5

Номограмма для определения угла поворота нормали по величине искажения линии отражения

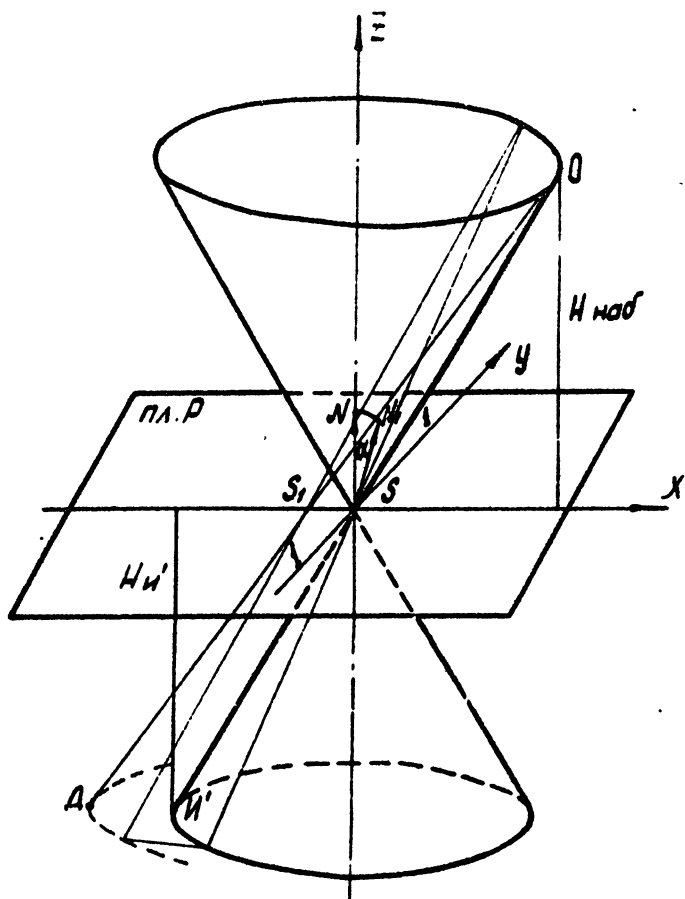


Рис. 6

Взаимные положения мнимого изображения и точки наблюдения для обеспечения постоянства положения точки отражения



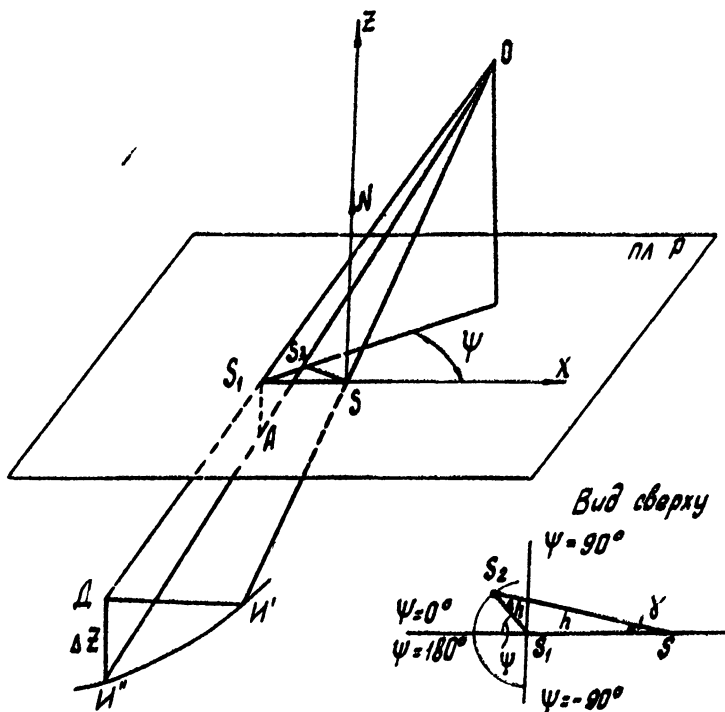


Рис. 8

Влияние положения точки наблюдения на положение точки отражения в касательной плоскости.

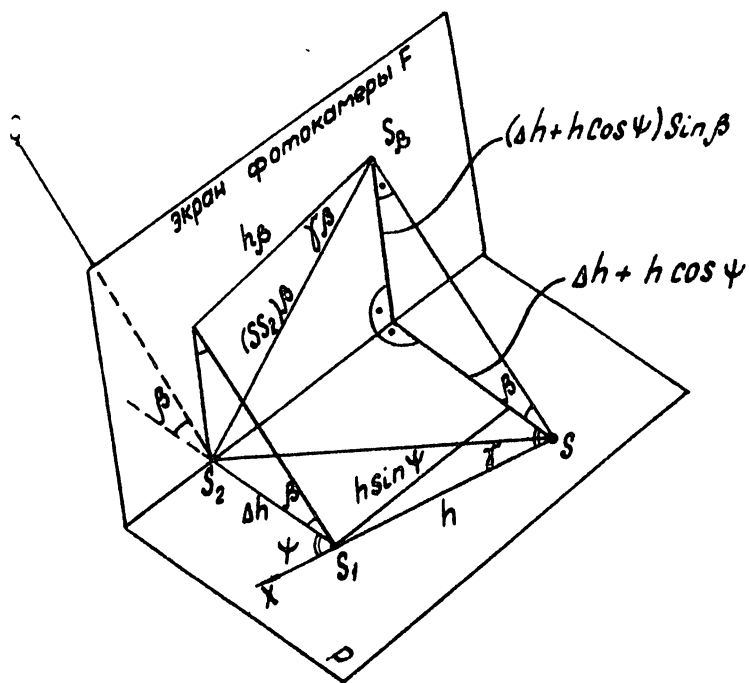


Рис. 9

К определению величины воспринимаемого глазом перемещения

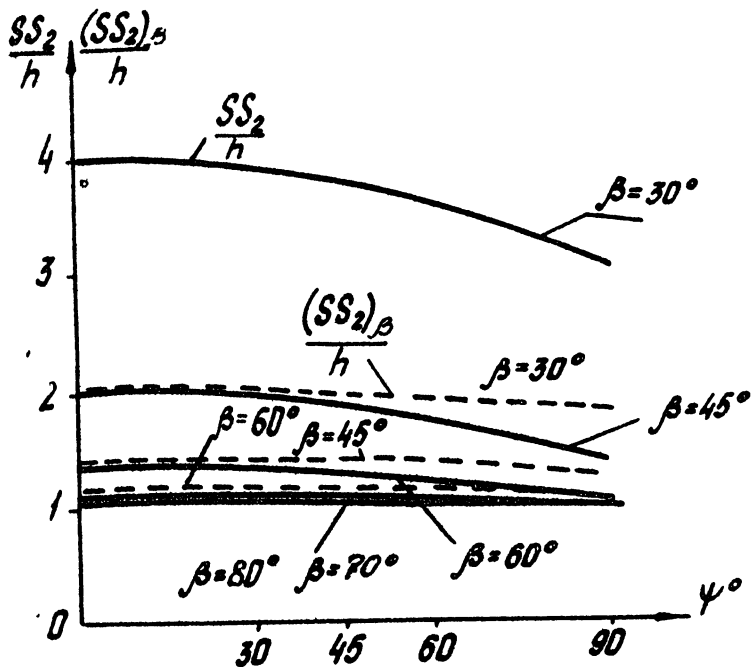


Рис. 10

Влияние углов  $\psi$  и  $\beta$  на величину перемещения  $SS_2$  и ее проекцию на экран фотокамеры  $(SS_2)_\beta$  в долях перемещения  $h$ .

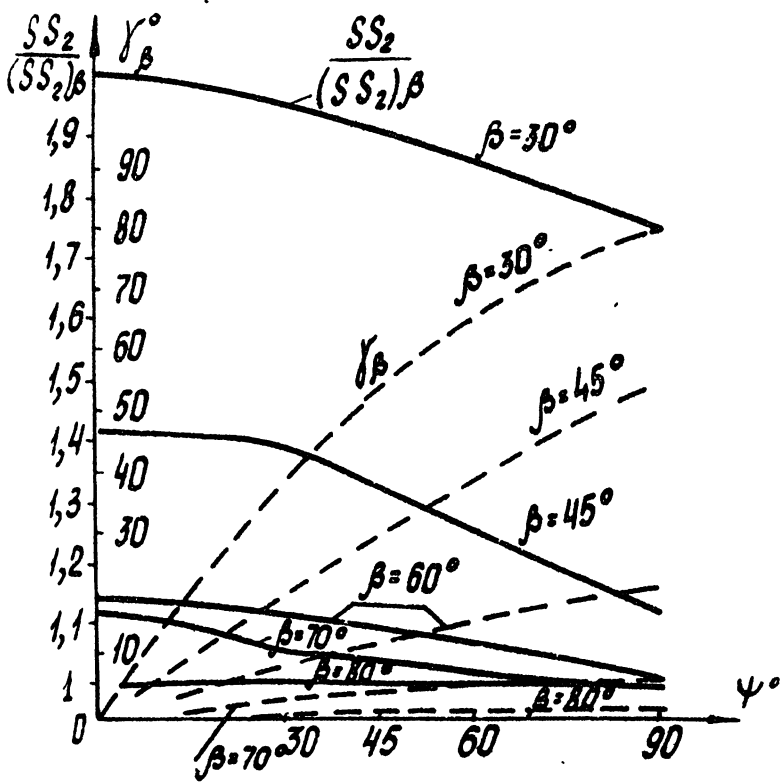


Рис. 11

Влияние углов  $\psi$  и  $\beta$  на отклонение  $\frac{SS_2}{(SS_2)_\beta}$  и на угол  $\gamma$  между  $(SS_2)_\beta$  и  $h_\beta$

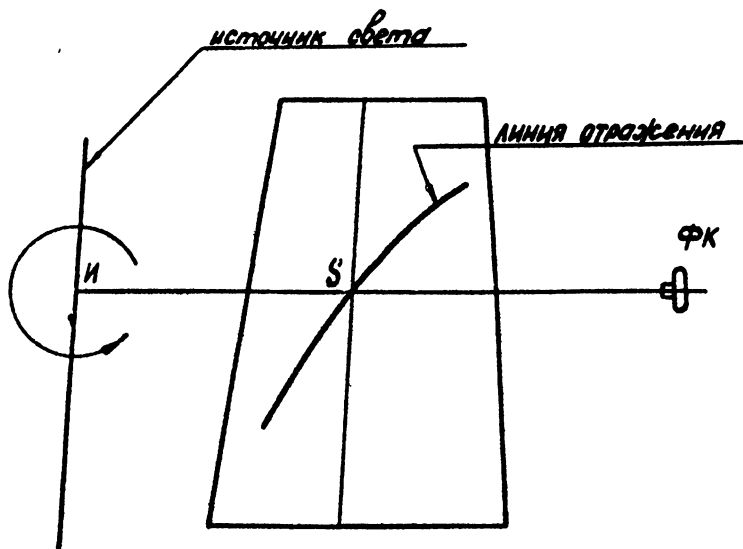


Рис. 12

Визуализация перемещения точки отражения в окрестности точки  $S'$  поверхности вращением источника света вокруг точки  $И$ , наблюдаемой в точке  $S'$





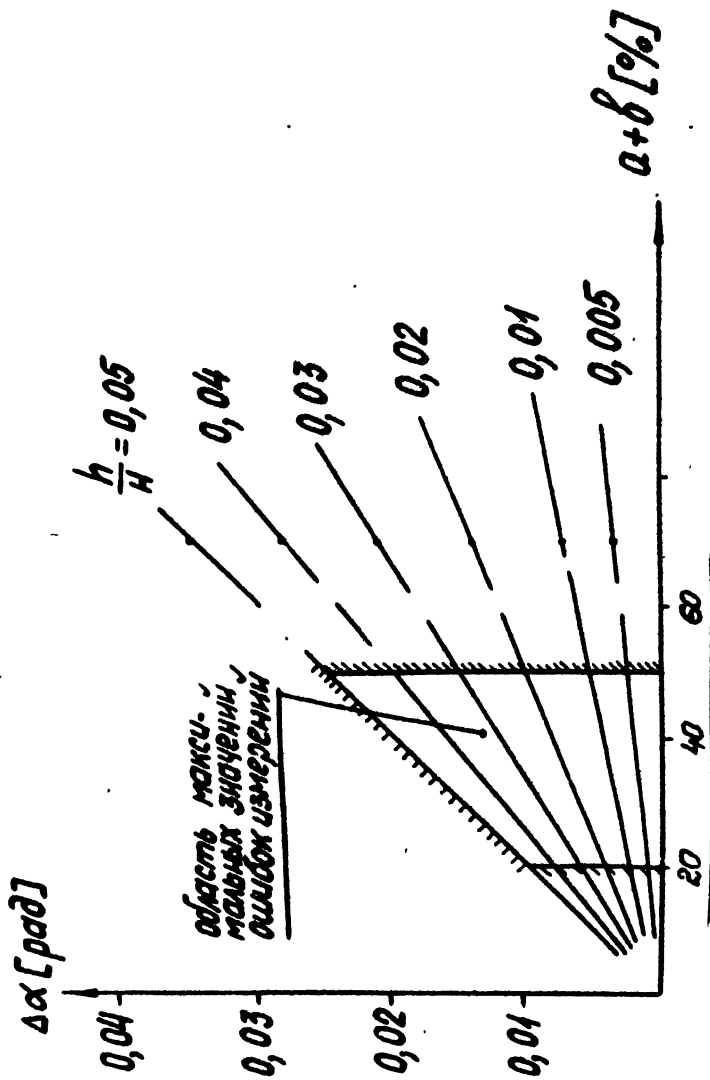


Рис. 14

Зависимость ошибки определения угла поворота нормали от точности измерения высоты  $H_{\text{изм.}}$ ,  $H$  и пере-  
 мещения  $h$  при углах  $15' < \alpha < 3^\circ$ .

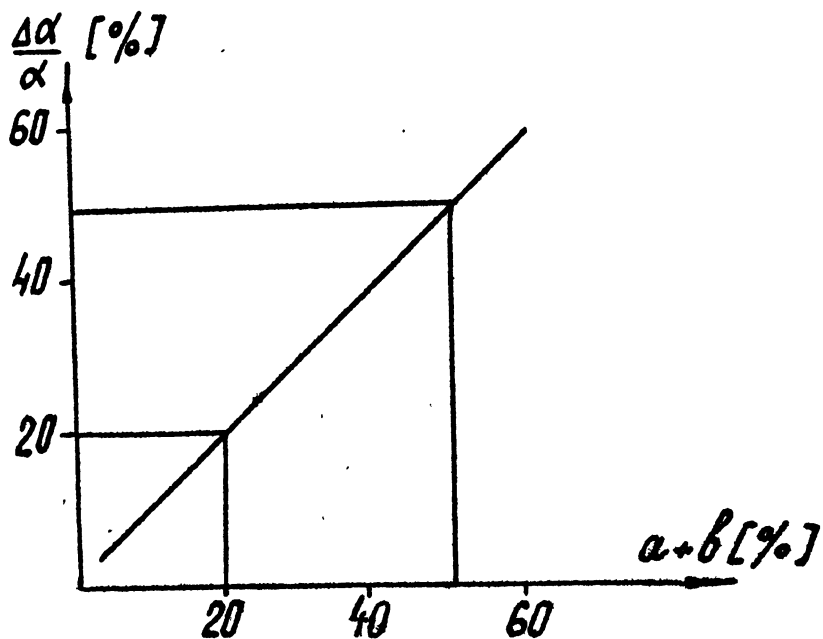


Рис. 15

Максимальная относительная ошибка определения угла  $\alpha$  в зависимости от точности измерения  $H$  и  $h$  при углах  $15^\circ < \alpha < 3^\circ$ .



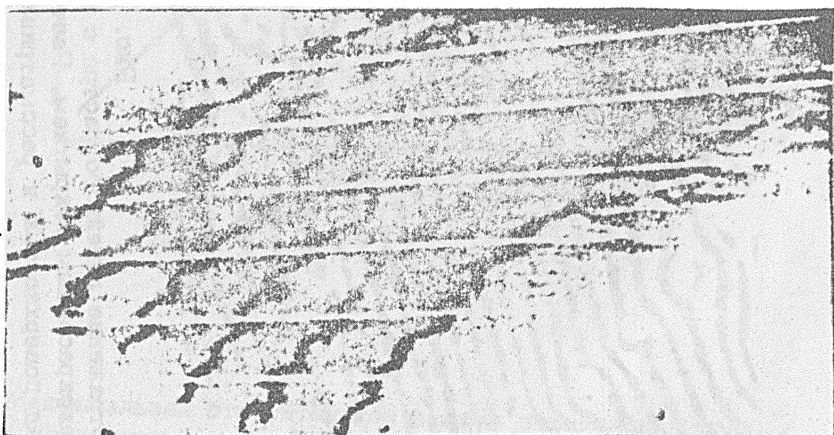
**Рис. 16**

**Отражение линейного раstra с шагом 10 мм от поверхности с лакокрасочным покрытием. Растр помещен на высоте 500 мм над поверхностью и рассматривается с высоты 1500 мм**



**Рис. 17**

**Полудиффузное отражение двух точечных источников  
от листа обшивки**



**Рис. 18**

**Отражение щелевых источников света в поверхности,  
покрытой тонким слоем маслянистой жидкости  
(гидросмесью АМГ-10)**

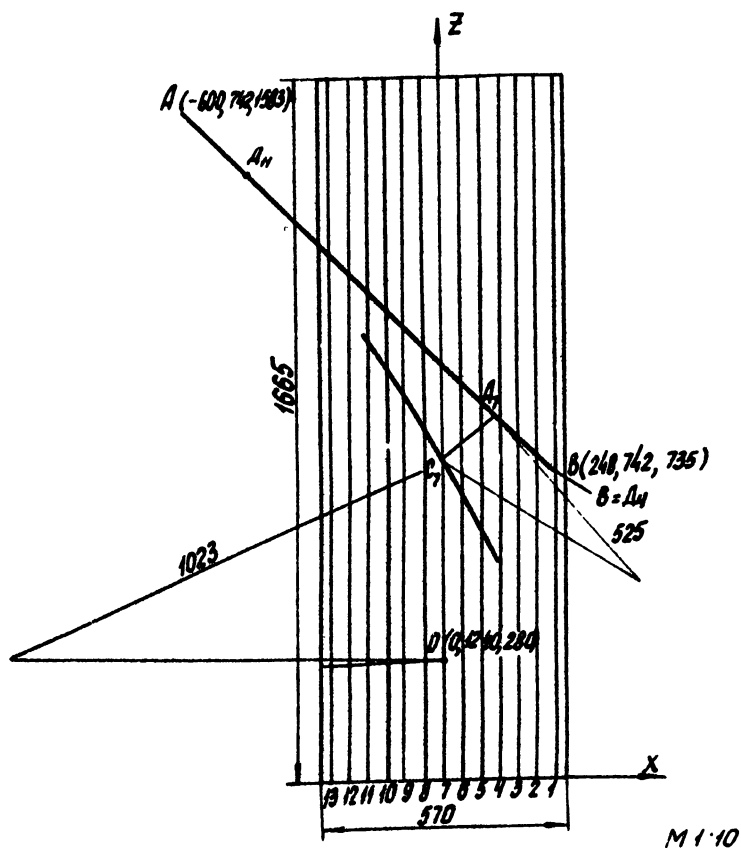


Рис. 19

Схема размещения источника света, фотокамеры и контролируемой поверхности.

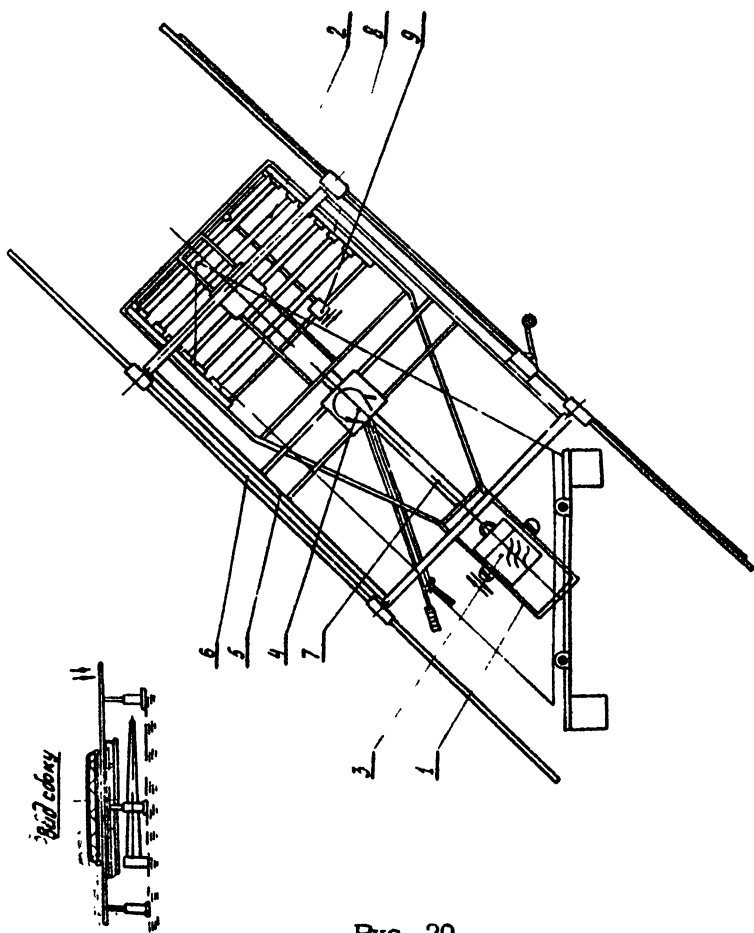
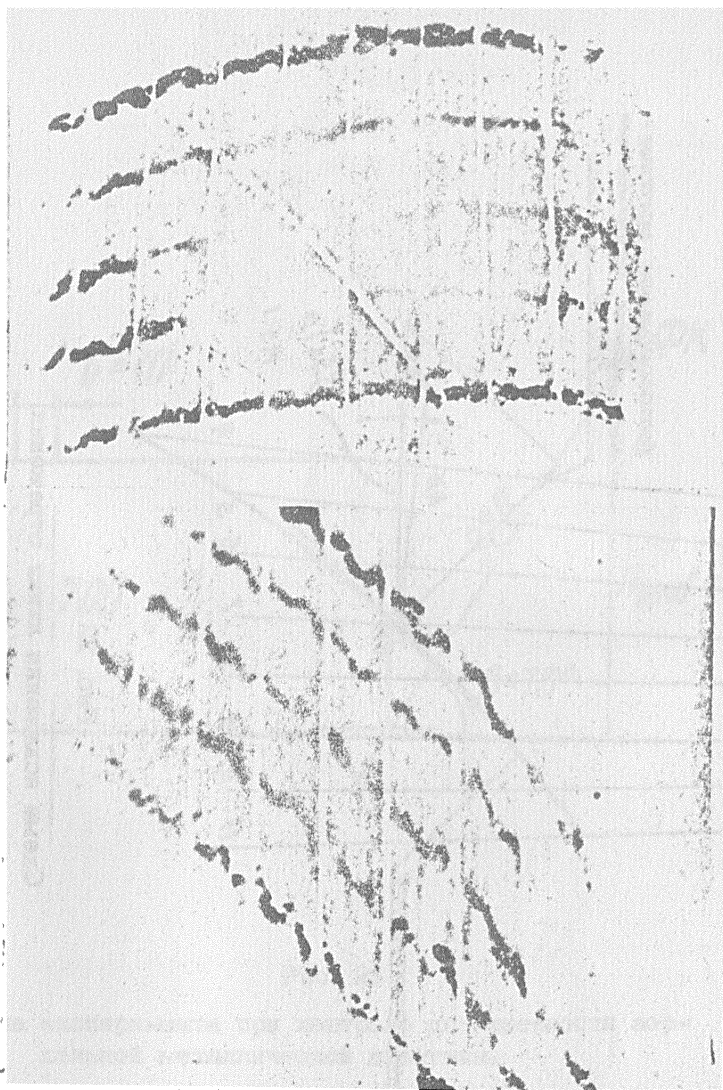


Рис. 20

Принципиальная схема устройства для контроля  
зеркально-оптическим методом



**Рис. 21**

**Линии отражения при положении источников света  
вдоль волнистой панели**



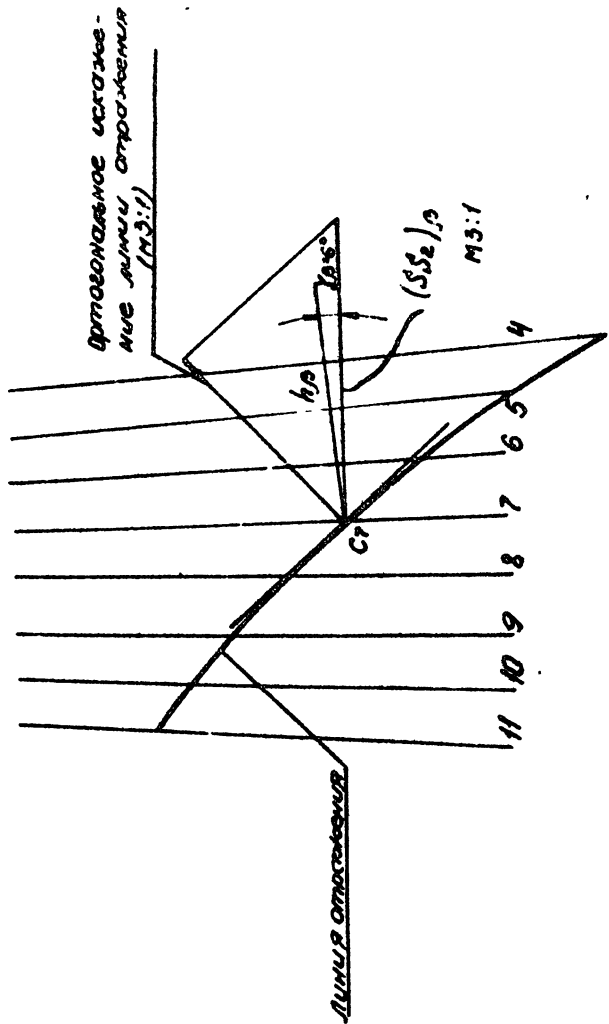


Рис. 22

Схема искажения линии отражения

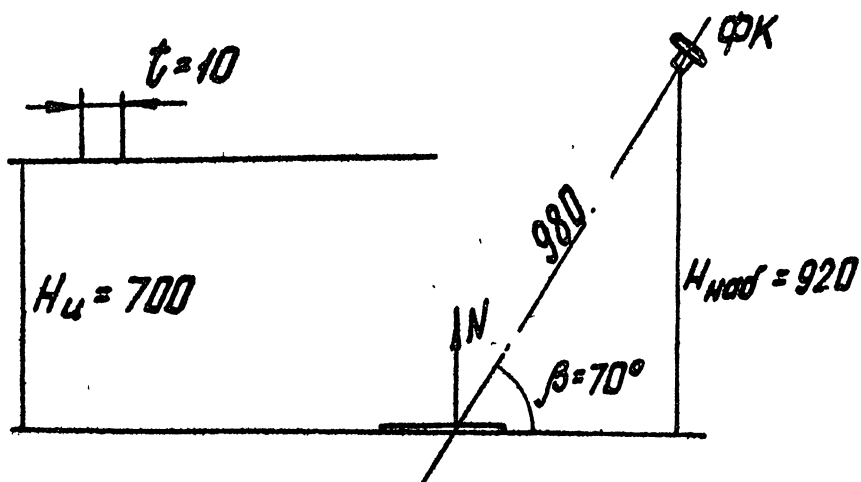


Рис. 23

Схема эксперимента при контроле плоскости зеркальной металлической пластины.

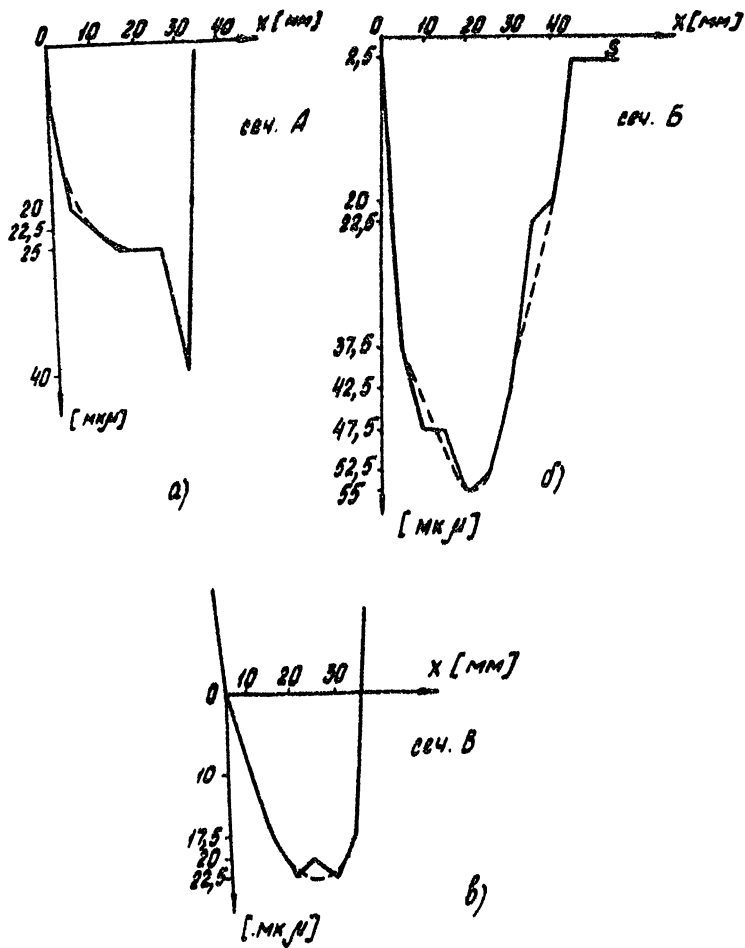


Рис. 24

Профилограммы зеркальной пластины

а) по сеч. А, б) по сеч. Б, в) по сеч. В.

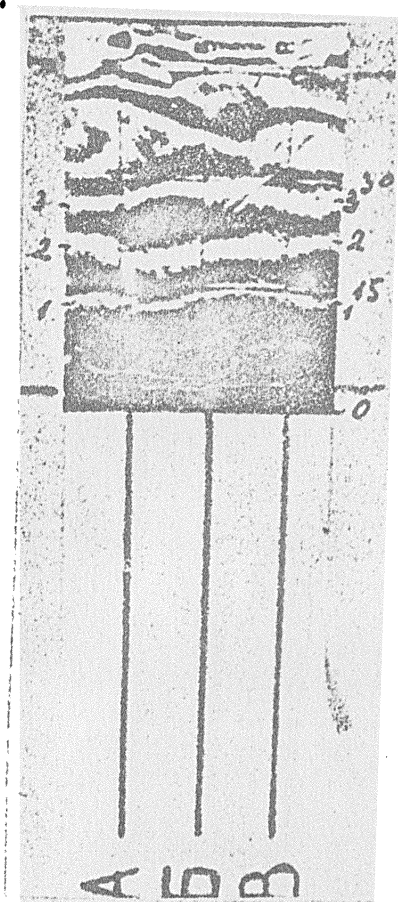


Рис. 25

Картина линий отражения раstra на участке пластины