

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО СЪЕМА СТЕКЛА И АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СТАНКАХ СЕРИИ АД ПО ПРОГРАММЕ АД 1**

Абдулкадыров М.А. \*, Горшков В.А. \*\*, Семёнов А.П. \*, Савельев А.С. \*

\*ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

\*\*ФГУП НПО «Оптика»

## **Введение**

Крупные научно-технические достижения последнего времени в области освоения космического пространства, создания приборов и комплексов специального назначения в значительной мере стали возможны благодаря появлению новых высокоточных оптических наземных и космических систем. В связи с этим возросли требования к качеству поверхностей оптических деталей, увеличился диапазон их габаритов, часто используются детали с внеосевыми асферическими поверхностями, с произвольной конфигурацией внешнего периметра детали. Наряду с традиционными материалами, используемыми в оптическом производстве (оптические стекла, ситалл, кварц и др.), все более широкое применение находят нетрадиционные материалы (кремний, карбид кремния, бериллий и т. д.).

Классические методы формообразования не позволяют обеспечить финишную доводку высокоточных оптических элементов с требуемой точностью.

Для успешного решения задачи изготовления сложных оптических систем требуется совершенствование технологии формообразования ее

оптических элементов, развивая автоматизированные способы доводки поверхностей, которые позволяют осуществлять управляемый процесс доводки поверхности до высочайшего качества.

В основу разработанной технологии положено программное управление автоматизированным комплексом по формообразованию поверхностей оптических деталей с автоматизированной обработкой информации о форме поверхности, расчетом, уточнением и прогнозированием технологических режимов, управлением движением малого инструмента.

В состав автоматизированного комплекса входят:

- автоматизированные станки серии АД, управляемые от компьютера, для формообразования оптических деталей размером 100-4000 мм, с использованием малого осциллирующего инструмента, перемещающегося по поверхности детали в декартовой системе координат;

- комплект интерферометров для контроля формы поверхности на всех технологических стадиях, включающий автоматизированную фотоэлектрическую систему регистрации и обработки интерферограмм поверхности;

- гамма виброизолированных стендов и разгрузочно-базировочных технологических оправ мембранно-пневматического типа для разгрузки и стабилизации формы поверхностей оптических элементов на стадии их обработки и контроля, в том числе с автоматическим поддержанием параметров настройки при изменении внешних воздействий (атмосферное давление, температура);

- комплекс технологических программ КСРМ, AD2, применяемых для обработки интерферограммы волнового фронта контролируемой детали в реальном масштабе времени, расчета технологических параметров автоматизированного формообразования, автоматической коррекции технологического процесса по результатам сеанса автоматизированной обработки, прогнозирования получаемой формы поверхности.

Деталь при обработке располагается в специально разработанной штатно-технологической оправе мембранно-пневматического типа или разгрузочном приспособлении, которые обеспечивают ее стабильное состояние в процессе контроля, для обеспечения успешного сеанса автоматизированного формообразования. Разгрузочная оправа снабжена системой автоматической стабилизации положения зеркала на оправе при изменении внешних условий (атмосферного давления, влажности) во время контроля формы поверхности, что обеспечивает неизменное состояние формы поверхности с необходимой точностью. Для устранения воздушных потоков возможен контроль детали в вакууме в специальном испытательном комплексе УВК-6/70.

## Анализ погрешностей автоматизированного формообразования оптических поверхностей на станках серии АД по программе АД1

При изготовлении крупногабаритных оптических элементов успешно используется технологическая программа автоматизированного формообразования оптических поверхностей малым инструментом АД1 [1]. Целью настоящей статьи является анализ погрешностей автоматизированного формообразования, их количественная оценка и определение суммарной величины погрешностей для того, чтобы сделать вывод о возможности применения разработанного технологического процесса для формообразования поверхностей высокоточных оптических деталей и наметить дальнейшие пути его совершенствования.

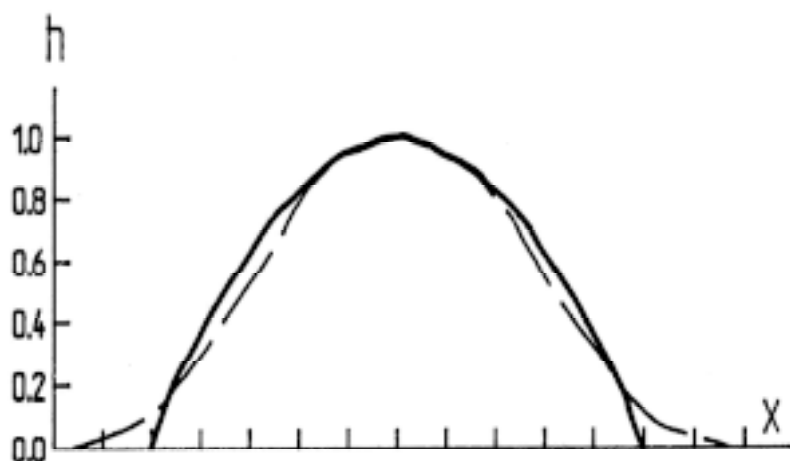
Структурная схема погрешностей автоматизированного формообразования показана на рис.1.



Рис.1. Погрешности автоматизированного формообразования

Наличие указанных погрешностей приводит к тому, что полученная в результате обработки форма оптической поверхности отличается от прогнозируемой, так как съём материала на каждом элементарном участке поверхности [1] не соответствует расчетному.

Методические погрешности определяются математической моделью автоматизированного формообразования, заложенной в программу «АД1». В реальном сеансе обработки инструмент перемещается по элементарной площадке, проходя через ее центр, хотя в расчетах предполагается, что центр плоскопараллельного кругового движения инструмента совпадает с центром элементарной площадки все время работы на ней. На рис.2 сплошной линией представлен экспериментальный профиль съема [2]. Пунктирной линией изображен профиль съема, рассчитанный математически для случая перемещения инструмента по элементарной площадке. Отличие указанных профилей съема (по отношению площадей) составляет 3% и является погрешностью профиля съема.



**Рис.2.** Профили съема материала инструментом при позиционировании инструмента в центре элементарной площадки (сплошная линия) и при перемещении инструмента (пунктирная линия) в условных единицах (h)

При расчете материала скоростью обработки считается скорость плоскопараллельного кругового движения инструмента вокруг некоторой оси, смещенной от центра инструмента на величину эксцентриситета  $\epsilon$ , а линейная скорость его перемещения не учитывается. Оценим величину возникающей ввиду этого погрешности:

Угловая скорость  $\omega$  определяется количеством оборотов шпинделя  $n$ :

$$\omega = 2\pi n, \quad (1)$$

а скорость обработки

$$V_\epsilon = \epsilon\omega. \quad (2)$$

Допустим, что инструмент перемещается линейно по элементарной площадке вдоль оси  $X$  со скоростью  $V_\epsilon$ . Тогда составляющие скорости вдоль осей  $X$  и  $Y$  будут равны:

$$V_x = \epsilon\omega\cos\varphi + V_\epsilon, \quad (3)$$

$$V_y = \epsilon\omega\sin\varphi, \quad (4)$$

где  $\varphi$  – угол между осью  $X$  и направлением скорости плоскопараллельного кругового движения в текущий момент времени. Суммарная скорость обработки:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{V_\epsilon^2 + \epsilon^2\omega^2 + 2\epsilon\omega\cos\varphi V_\epsilon}. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$a = V_\epsilon^2 + \epsilon^2\omega^2, \quad (6)$$

$$b = 2\epsilon\omega V_\epsilon, \quad (7)$$

тогда средняя скорость за полупериод вращения шпинделя инструмента

$$\bar{V} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{a + b\cos\varphi} d\varphi, \quad (8)$$

так как  $V_\epsilon < \epsilon\omega$ , то  $b/a < 1$ , т.е.  $\bar{V}$  мало отличается от  $\epsilon\omega$ . Например,  $\epsilon = 5$ ,  $n=180$  об/мин,  $V_\epsilon = 300$  мм/мин,  $\bar{V} = 5662,6$  мм/мин, а  $V_\epsilon = 5654,9$  мм/мин.

Опыт автоматизированного формообразования на станках АД-1000 и АД-2000 [3] показал, что скорость  $V_\epsilon$  как правило не превышает 300 мм/мин, а  $V_\epsilon$  обычно больше указанного в примере значения. Таким образом, погрешность съема материала, возникающая в результате линейного перемещения инструмента, не превышает 0,15%.

Необходимо заметить, что на скорость обработки не влияет проворот инструмента вследствие свободного притира, так как в этом случае для точек на детали под инструментом скорость от плоскопараллельного кругового движения и скорость от вращения инструмента вокруг своей оси полупериода складываются, а вторую половину периода вычитаются, в результате чего средняя скорость обработки остается постоянной.

1. К методическим погрешностям автоматизированного формообразования также относятся погрешность расчета на ЭВМ съема материала и времени пребывания инструмента в элементарных площадках, которая не превышает  $\pm 3\%$  от точного решения, и погрешность, обусловленная изменением величины нормального давления инструмента на деталь из-за ее кривизны (при обработке плоских деталей эта погрешность отсутствует). Рассмотрим величину этой погрешности, учитывая, что на станках серии АД обрабатываются детали с отношением  $D/R$  не более  $1/2,5$ , где  $D$  – диаметр детали,  $R$  – радиус кривизны.

Нормальное давление  $P_n$  определяется как

$$P_n = P \cos \alpha, \quad (9)$$

где  $P$  – общее давление инструмента на деталь,  $\alpha$  – угол наклона инструмента. Иначе  $P_n$  можно выразить как

$$P_n = P \frac{\sqrt{R - \left(\frac{D}{2}\right)^2}}{R}. \quad (10)$$

В предельном случае при  $D/R = 2,5$   $P_n = 0,98P$ , т.е. погрешность не превышает  $2\%$ .

Учитывая, что все рассмотренные погрешности являются случайными, находим результирующую величину методической погрешности  $\Delta_M$ :

$$\Delta_M = \sqrt{0,03^2 + 0,0015^2 + 0,03^2 + 0,02^2} = 0,049. \quad (11)$$

Таким образом, методическая погрешность съема материала на каждой элементарной площадке составляет  $4,9\%$  от расчетной величины.

2. Приборные погрешности связаны с конкретным оборудованием, используемым для реализации разработанного алгоритма автоматизированного формообразования.

Время пребывания центра инструмента в пределах элементарной площадки определяется линейной скоростью перемещения по ней, задаваемой устройством ЧПУ. Погрешность отработки скорости можно

оценить по отношению рассчитанного времени сеанса к реально отработанному. Так, при эксплуатации станков АД-1000 и АД-2000 величина указанной погрешности не превышает  $\pm 4\%$ .

Погрешность воспроизведения заданного давления зависит от конструкции пневмостанции, используемой в указанных станках, и конструкции инструментальной насадки [3]. Экспериментальным путем установлено, что данная погрешность составляет  $\pm(2...3)\%$ . Кроме того, давление в пневмосистеме достигает номинального значения за 0,5...1,2 с [4], в результате чего возникает погрешность, которую авторы оценили в 1...2%, основываясь на количественном соотношении рабочих и холостых переходов инструмента и средней продолжительности рабочих переходов в реальных сеансах обработки.

Погрешность скорости обработки  $V = 2\pi n\epsilon$  определяется погрешностью установки эксцентриситета и количества оборотов шпинделя. На эксплуатируемых станках серии АД эти величины не превышают соответственно  $\pm(2...2,5)\%$  и  $\pm(1...2)\%$ .

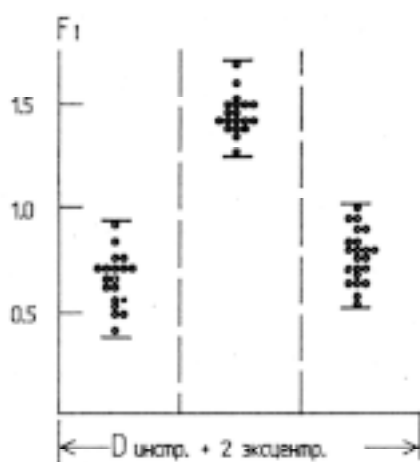
Необходимым условием при автоматизированном формообразовании является совмещение системы координат станка с системой координат обрабатываемой детали, так как их несовпадение приводит к несоответствию математической модели реальным условиям обработки. Практический опыт показал, что погрешность совмещения систем координат составляет 2...3 мм, что не превышает 1/10...1/20 шага топографической карты. Из рис.2 видно, что даже в том случае, когда профиль съема представляется тремя шагами топографической карты, величина съема в расчетной центральной точке изменяется меньше, чем на 0,5%. Когда же профиль съема представляется пятью или семью шагами топографической карты, указанная погрешность будет еще меньше.

Результирующая величина приборной погрешности будет равна:

$$\Delta_{\Pi} = \sqrt{0,04^2 + 0,03^2 + 0,02^2 + 0,025^2 + 0,02^2 + 0,005^2} = 0,0625, \text{ или } 6,25\%. \quad (12)$$

3. Значения технологических погрешностей зависят как от нестабильности внешних факторов (например, температура окружающей среды), так и непосредственно от условий обработки (твердость полировальной смолы, концентрация полирующей суспензии и т.д.). Так, значение коэффициента съема, несмотря на то, что эксперименты проводились в термостатированном помещении, удалось определить с погрешностью  $\pm 20\%$ .

Значительными оказались флуктуации профиля съема из-за неравномерного распределения полирующей суспензии под инструментом, неполного притира полировальника к оптической поверхности и т.д. Так, отклонения коэффициента профиля съема [2] (см.рис.3) в его центре от среднего значения составили  $\pm 16\%$ .



**Рис.3.** Флуктуации коэффициентов профиля съема ( $F_1$ ) для инструмента, представленного тремя точками по диаметру

Нелинейности зависимости съема от скорости обработки и давления в диапазоне применяемых давлений (10...150 г/см<sup>2</sup>) и скоростей (60...400 мм/с) замечено не было.

Искажение профиля съема из-за выхода инструмента за край обрабатываемой детали, а следовательно, и возникающую при этом погрешность количественно оценить не удалось. В настоящее время этот вопрос находится в стадии изучения.

Таким образом, технологические погрешности в сумме составляют:

$$\Delta_T = \sqrt{0,2 + 0,16^2} = 0,256, \text{ или } 25,6\%. \quad (13)$$



Суммарная погрешность автоматизированного формообразования равна:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta_{\text{М}}^2 + \Delta_{\text{П}}^2 + \Delta_{\text{Т}}^2}, \quad (14)$$

$$\Delta_{\Sigma} \sqrt{0,049^2 + 0,0625^2 + 0,256^2} = 0,268, \text{ или } 26,8\%. \quad (15)$$

Полученное значение  $\Delta_{\Sigma}$  говорит о том, что съем материала на каждой элементарной площадке может отличаться от рассчитанного на 26,8%.

Математическое моделирование автоматизированного формообразования, проведенное авторами при условии, что съем на каждой элементарной площадке может меняться в диапазоне  $\pm 50\%$  от заданного значения, показало сходимость процесса формообразования. На практике, как следует из изложенного материала, погрешность оказывается почти в два раза меньше, что является надежной гарантией положительного результата при использовании разработанного техпроцесса. В то же время полученный результат показывает большие возможности совершенствования техпроцесса автоматизированного формообразования путем стабилизации в первую очередь технологических факторов.

### **Определение абсолютного съема при автоматизированной доводке оптических поверхностей по программе AD1**

Важной составной частью программных расчетов является определение съема материала детали и прогнозируемой топографии поверхности, а следовательно, и времени пребывания малого инструмента в пределах элементарной площадки. От достоверности данного расчета, т.е. от соответствия полученного решения реальному физическому процессу, в итоге зависит успех автоматизированной доводки оптических поверхностей.

Стабильная сходимость процесса автоматизированной доводки была получена на основе экспериментального изучения технологического коэффициента и профиля съема [7] при различных режимах и условиях обработки (давление, скорость, марка стекла, марка смолы и т.д.).

Определение технологического коэффициента для каждой конкретной комбинации стекло – смола – полирит является довольно трудоемким процессом. Кроме того, как показали многочисленные сеансы автоматизированной обработки, при прочих равных условиях, но на другой оптической детали (другая варка стекла и т.д.) технологический коэффициент

может меняться, поэтому требуется коррекция технологического коэффициента в течение итерационного процесса обработки и уточнение его на первоначальных стадиях доводки оптической поверхности до тех пор, пока не будет полной уверенности в надежности его определения. При этом необходим такой способ уточнения технологического коэффициента, при котором можно было бы также выяснить стабильность формы поверхности на различных этапах технологического цикла, так как в противном случае деформация детали может оказать существенное влияние на достоверность величины технологического коэффициента.

При обработке оптических деталей по программе AD1 технологический коэффициент определяется независимо от вида полировальника и кинематики его движения [7].

В первых сеансах обработки оптическая поверхность, как правило, имеет регулярные ошибки типа зональных и астигматизма. Способ уточнения технологического коэффициента основан на том, что в процессе сеанса обработки оптической поверхности оставляют широкие необработанные участки, которые служат в качестве опорной поверхности, от которой определяется величина абсолютного съема по топографиям до и после обработки оптической поверхности.

Необходимым условием правильного определения абсолютного съема является сохранение формы необрабатываемой области при контроле, т.е. стабильность формы поверхности на этом этапе технологического цикла.

Пусть  $S$  – необрабатываемая область оптической поверхности.  $X_m$  и  $Y_n$  – координаты узлов квадратной сетки декартовой системы координат на детали, в которых определяются величины нормальных отклонений формы поверхности от требуемой. Для простоты изложения ближайшую поверхность будем называть ближайшей сферой.

$\Delta N_{mn}^{(1)}$  – нормальное отклонение формы поверхности от ближайшей сферы на всей поверхности до обработки.

$\Delta N_{mn}^{(2)}$  – нормальное отклонение формы поверхности от новой ближайшей сферы на всей поверхности после обработки.

$\Delta N_{mn}^{(1)} + \Delta N_{mn}^{(2)}$  получены в одних и тех же точках  $m, n$  обрабатываемой детали по результатам обработки интерферограмм оптической поверхности. Решая известную систему уравнений [6] вида

$$A_1 + B_1 X_m + C_1 Y_n + D_1 (X_m^2 + Y_n^2) - \Delta N_{mn}^{(1)} \quad (16)$$

лишь для точек  $m, n$ , принадлежащих области  $S$ , и определяя коэффициенты  $A_1, B_1, C_1, D_1$  методом наименьших квадратов, получаем отклонения формы поверхности от ближайшей сферы в области  $S$  до обработки детали:

$$\Delta W_{mn}^{(1)} = A_1 + B_1 X_m + C_1 Y_n + D_1 (X_m^2 + Y_n^2) = \Delta N_{mn}^{(1)}. \quad (17)$$

Аналогичным образом получаем отклонения в той же области поверхности после сеанса обработки:

$$\Delta W_{mn}^{(2)} = A_2 + B_2 X_m + C_2 Y_n + D_2 (X_m^2 + Y_n^2) - \Delta N_{mn}^{(2)}. \quad (18)$$

При сохранении условий разгрузки оптической детали и достоверности контроля оптической поверхности должно соблюдаться условие

$$\Delta W_{mn}^{(2)} \approx \Delta W_{mn}^{(1)}. \quad (19)$$

Ясно, что полного выполнения этого равенства не может быть из-за влияния деформаций оптической детали, погрешностей контроля формы поверхности и погрешностей математической обработки. Остановимся на этом далее, а сейчас предположим, что опорная сфера не изменилась, т.е. имеет те же самые нормальные отклонения с достаточной степенью точности. Тогда определяем уточненные, усредненные коэффициенты ближайшей сферы необрабатываемой области  $S$  из системы уравнений:

$$A + B X_m + C Y_n + D (X_m^2 + Y_n^2) = \Delta W_{mn}, \quad (20)$$

$$\text{где } \Delta W_{mn} = (\Delta W_{mn}^{(1)} + \Delta W_{mn}^{(2)}) / 2, \quad (21)$$

а  $\Delta W_{mn}^{(1)}$  и  $\Delta W_{mn}^{(2)}$  определяются соотношениями (17) и (18).

После вычисления коэффициентов  $A, B, C$  и  $D$  для области  $S$  строим карту нормальных отклонений всей поверхности до и после обработки относительно ближайшей поверхности для области  $S$ :

$$\Delta W_{mn}^{(3)} = A + B X_m + C Y_n + D (X_m^2 + Y_n^2) - \Delta N_{mn}; \quad (22)$$

$$\Delta W_{mn}^{(4)} = A + B X_m + C Y_n + D (X_m^2 + Y_n^2) - \Delta N_{mn}^{(2)}. \quad (23)$$

Тогда карта реального абсолютного съема с точностью до погрешностей измерений определяется следующим образом:

$$\Delta W_{mn}^{(5)} = \Delta W_{mn}^{(3)} - \Delta W_{mn}^{(4)} \quad (24)$$

при условии выполнения соотношения (19).

Из теоретических расчетов абсолютного съема по программе AD1 определяется карта съема  $H_{mn}$  для всей поверхности. Тогда новый технологический коэффициент вычисляется из простого соотношения

$$K' = K \sum_{m,n=1}^N \Delta W_{mn}^{(5)} / \sum_{m,n=1}^N H_{mn}, \quad (25)$$

где  $K$  – технологический коэффициент, используемый при расчете проведенного сеанса доводки поверхности.

Таким образом, в первоначальных сеансах обработки можно уточнить технологический коэффициент съема и более успешно проводить автоматизированную доводку. В процессе дальнейшей обработки оптической поверхности можно периодически проводить короткие сеансы таким образом, чтобы оставалось не менее 50% поверхности, свободной от обработки, для определения карты абсолютного съема  $\Delta W_{mn}^{(5)}$  (24), при этом прежде всего контролируя неизменность необрабатываемой зоны, используя критерий (19). Исходя из него, можно определить относительное изменение формы поверхности, неподверженной воздействию полировальника, как

$$\Delta W_{mn}^{(6)} = \Delta W_{mn}^{(2)} - \Delta W_{mn}^{(1)}, \quad (26)$$

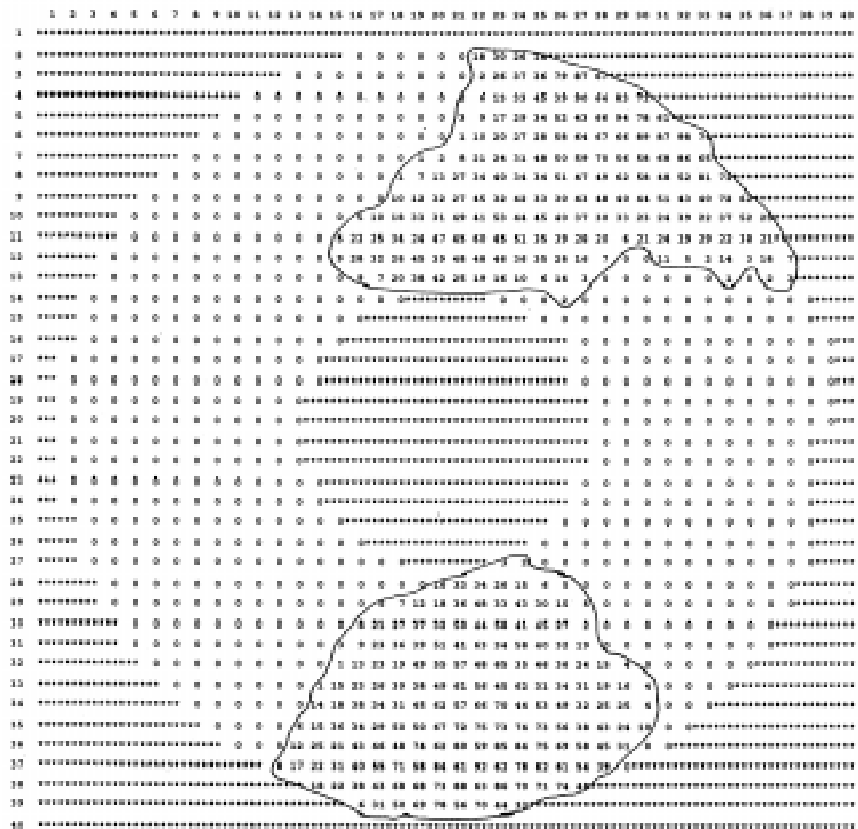
где  $\Delta W_{mn}^{(6)}$  рассчитаны относительно новой ближайшей сферы.

Для успешной обработки оптической поверхности необходимо, чтобы среднеквадратическое отклонение волнового фронта, характеризующего относительное изменение необрабатываемой поверхности  $\sigma_s$  и определяемое по отклонениям соотношения (26), было бы меньше требуемого отклонения всей поверхности  $\sigma_s < \sigma$ . Только в этом случае можно надеяться получить поверхность высокого качества. Если это условие не выполняется, то необходимо позаботиться о повышении стабильности формы оптической поверхности.

Результаты определения абсолютного съема в одном из сеансов представлены на рис.4 и 5. Обрабатывалась асферическая поверхность детали из ситалла СО-115М диаметром 1540 мм полировальником 100 мм. Время обработки детали около 7 ч. Удельное давление на деталь 40 г/см<sup>2</sup>, скорость обработки 9000 мм/мин. Топография поверхности до и после обработки, а также предполагаемая топография для данного сеанса приведены в работе [5].

На рис. 4, 5 обрабатываемые зоны обведены и приведен уточненный технологический коэффициент. Среднеквадратическое отклонение относительной деформации волнового фронта необрабатываемой поверхности  $\sigma_s = 0,06\lambda$ , где  $\lambda = 0,6328$  мкм. Для повышения достоверности отбрасываются нормальные отклонения на краю детали, так как они определяются с наибольшей погрешностью. Периодически определяя  $\sigma_s$ , можно приблизительно уточнить предельную величину  $\sigma$  всей поверхности, которую можно достигнуть при данных условиях обработки и контроля.

Изложенная методика позволяет не только оперативно уточнять значение технологического коэффициента и оценивать качество разгрузки, но и изучать характер съема на различных участках асферических поверхностей, а также изучать изменение съема с течением времени и на краю детали. Описанный способ может использоваться для статистического анализа съема.



**Рис.4.** Карта предполагаемого съема на детали диаметром 1540 мм

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ - .00035  
 В ОДНОЙ ЕДИНИЦЕ - .002275 МКМ  
 ДЛЯ ПОСТР. ОПОРН. СФЕРЫ ОТОБРАНО 629 ТОЧЕК  
 СР. КВ. ОТКЛОНЕНИЕ ОПОРН. СФЕРЫ ДО ОБР. = .181  
 СР. КВ. ОТКЛОНЕНИЕ ОПОРН. СФЕРЫ ПОСЛЕ ОБР. = .185  
 СР. КВ. ОТКЛОНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СФЕРЫ = .058

РЕАЛЬНАЯ КАРТА СЪЕМА  
 В ОДНОЙ ЕДИНИЦЕ = .002275 МКМ

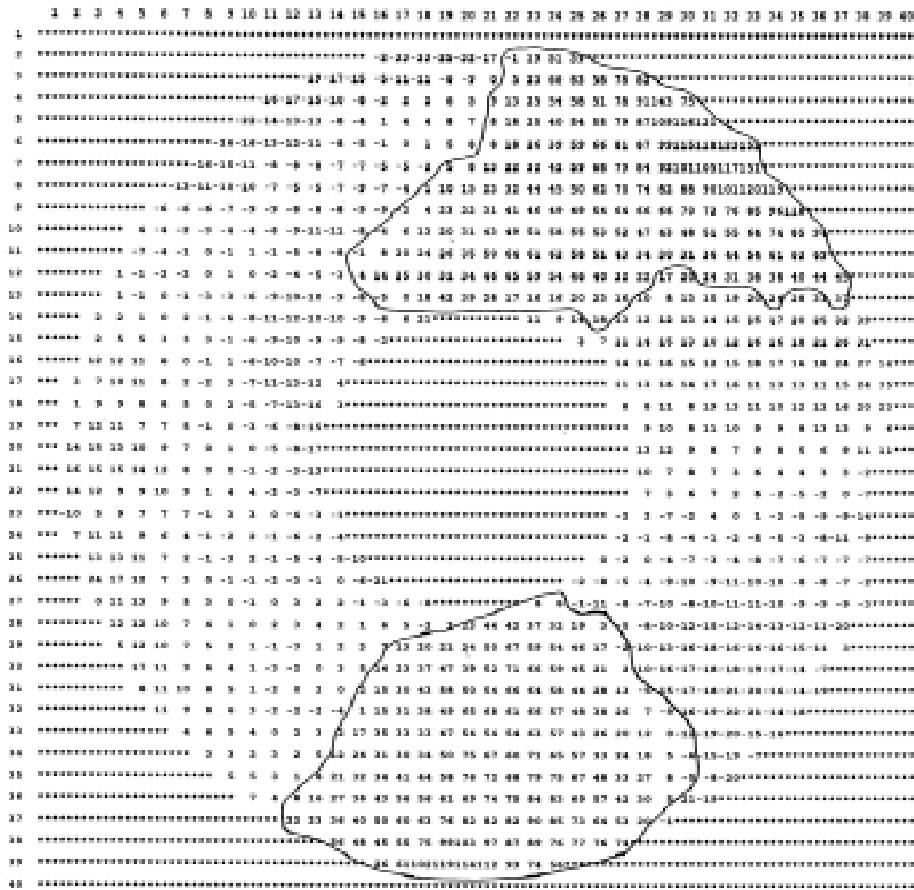


рис.5. карта реального съема на детали (см. рис.4)  
 после сеанса обработки  
 Новый технологический коэффициент = 0.090447

### Заключение

В настоящее время ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», используя автоматизированную технологию формообразования оптических поверхностей, осуществляет изготовление плоских сферических и асферических элементов диаметром от 100 мм до 3200 мм. Достигнутое RMS поверхности от требуемой равно 0,01-0,03λ, размах отклонений около 0,1λ.

Для определённой номенклатуры оптических элементов разработанная технология является единственной, применимой для получения требуемой точности оптических поверхностей.

Финишная доводка поверхности оптического элемента диаметром до 2000 мм с классом чистоты  $P = V$  и RMS в пределах  $1-2\lambda$  до величины RMS порядка  $0,01-0,02\lambda$  составляет примерно 45 календарных дней. Разработанное программно-математическое обеспечение позволяет исследовать особенности поведения материала заготовок стекла, деформационно-тепловые эффекты, возникающие в процессе обработки и в процессе операций транспортировки и установки оптического элемента в контрольную схему.

## Литература

1. Савельев А.С., Семенов А.П., Катагаров Ф.К. и др. // ОМП. – 1985. – №10. – С.35.
2. А.с. 1324829 // Бюл. изобр. – 1987. – С.52.
3. Лямин Ю.Б., Рябинин В.А. // ОМП. – 1987. – №7. – С.31.
4. Михнев Р.А., Штандель С.К. Оборудование оптических цехов. – М.: Машиностроение, 1981
5. Семенов А.П., Савельев А.С., Абдулкадыров М.А. // ОМП. – 1990. – №4 – С.61.
6. Семенов А.П., Савельев А.С., Абдулкадыров М.А. // ОМП. – 1990. – №1 – С.51.
7. Савельев А.С., Максакова М.П., Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Асадулин Р.Р. // ОМП. – 1989. – №9 – С.32.
8. Справочник технолога-оптика / Под ред. Кузнецова С.М., Окатова М.А.. – Л.: Машиностроение, 1983. – С.113.