

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫПУКЛЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВНЕОСЕВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С НЕКРУГОВЫМИ ОБРАЗУЮЩИМИ

© 2004 г. В. А. Горшков, канд. техн. наук; В. А. Жаворонков; Н. Г. Корнеев; А. Ю. Папаев

НПО "Оптика", Москва

E-mail: Optika@mail.cnt.ru

Дан анализ поверхности внеосевых фрагментов цилиндрических элементов с эллиптической и параболической образующими, обоснован выбор заготовки с минимальным объемом припуска. Описан процесс формообразования и доводки поверхностей, показаны особенности технологического интерференционного контроля. Приведены параметры изготовленных поверхностей.

Коды OCIS: 120.4610.

Поступила в редакцию 08.04.2004.

Введение

Дальнейшее развитие оптического приборостроения требует использования разнообразных асферических оптических элементов, в том числе внеосевых зеркал. Более того, внеосевые асферические поверхности требуются не только для работы в видимом и ближних к нему диапазонах, но и в устройствах синхротронного, рентгеновского и гамма-излучений. Например, в устройствах фокусировки рентгеновского излучения широко применяются вогнутые эллиптические и параболические элементы, работающие в скользящих пучках. Изготовление подобной оптики является трудоемким и уникальным процессом.

Вариантом решения проблемы мелкосерийного и серийного производства вогнутой асферической рентгеновской оптики может быть прессование элементов по выпуклой матрице, что обуславливает повышенные требования к точности формы поверхности матриц.

Целью настоящей работы было изготовление оптических поверхностей матриц в виде выпуклых фрагментов внеосевых эллиптического и параболического цилиндров. Максимальное отклонение наклона реальных поверхностей от идеала не должно превышать $(5-15) \times 10^{-5}$ рад.

Анализ поверхности

Общее уравнение сечения поверхности цилиндра с линейной образующей по Y может быть записано как

$$\hat{Z}^2 - 2P\hat{X} + Q\hat{X}^2 = 0. \quad (1)$$

Параметры цилиндрических поверхностей приведены в табл. 1, где P и Q — коэффициенты из урав-

нения (1), а X_c и Z_c — координаты центров внеосевых фрагментов, причем

$$\hat{Z}_c = \sqrt{2P\hat{X}_c - Q\hat{X}_c^2}. \quad (2)$$

Под длиной D подразумевается размер оптической поверхности по некруговой образующей (вдоль оси X). Размер оптической поверхности по линейной образующей не превышал 60 мм.

Введем локальную систему координат, совмещенную с центром фрагмента, так чтобы ее ось Z совпадала с нормалью к поверхности, а ось Y — с линейной образующей цилиндра. Тогда преобразование системы координат примет вид:

$$\begin{aligned} \hat{X} &= \hat{X}_c + X \cos \alpha - Z \sin \alpha, \\ \hat{Y} &= Y, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\hat{Z} = \hat{Z}_c + X \sin \alpha + Z \cos \alpha,$$

где

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P - Q\hat{X}_c}{\hat{Z}_c}. \quad (4)$$

Значения α , угла поворота системы координат, приведены в табл. 1.

Уравнение (1) в новой системе координат будет записано как

$$\begin{aligned} (\hat{Z}_c + X \sin \alpha + Z)^2 - 2P(\hat{X}_c + X \cos \alpha - Z \sin \alpha) + \\ + Q(\hat{X}_c + X \cos \alpha - Z \sin \alpha)^2 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Таблица 1. Основные параметры фрагментов эллиптического и параболического цилиндров

Сечение	P	Q	X_c , мм	Z_c , мм	D , мм	α , рад
Эллипс	0,1343	0,00068	102,4	4,51	66,0	0,014
Парабола	0,109	0	104,0	4,76	80,0	0,023

В (5) учтено, что $\operatorname{tg} \alpha = \sin \alpha = \alpha$ и разложение в силу малости α по сравнению с единицей ограничено только линейными членами. Квадратичная форма (5) может быть преобразована относительно Z к виду:

$$AZ^2 - 2BZ + C = 0, \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} A &= 1 + Q\alpha^2, \\ B &= -\hat{Z}_c - X\alpha + P\alpha + Q\hat{X}_c\alpha + QX\alpha, \\ C &= X^2\alpha^2 + 2\hat{Z}_cX\alpha - 2PX + QX^2 + 2Q\hat{X}_cX. \end{aligned} \quad (7)$$

Из оценки слагаемых в (7) следует, что

$$\begin{aligned} Q\alpha^2 &\ll 1, \\ P\alpha + Q\hat{X}_c\alpha + QX\alpha &\ll \hat{Z}_c + X\alpha, \\ 2\hat{Z}_cX\alpha - 2PX + 2Q\hat{X}_cX &\ll X^2\alpha^2 + QX^2 \end{aligned} \quad (8)$$

и вкладом малых поправок в дальнейшем можно пренебречь. Более того, из оценок следует, что $B^2 \gg C$.

Тогда решение уравнения (6) можно привести к виду:

$$Z = B - \sqrt{B^2 - C} = B - B\sqrt{1 - C/B^2} = \frac{C}{2B}, \quad (9)$$

где в силу малости отношения по сравнению с единицей разложение радикала ограничено линейным членом. Подставляя в (9) значения B и C и учитывая, что $\hat{Z}_c \gg X\alpha$, получаем, что

$$Z = \frac{B + \alpha^2}{2\hat{Z}_c} X^2 - \frac{(B + \alpha^2)\alpha}{2\hat{Z}_c^2} X^3 + \dots \quad (10)$$

Здесь также в силу малости пренебрегаем более высокими порядками.

Разложение (10) показывает, что некруговые цилиндрические поверхности в первом приближении могут быть представлены как совокупность параболического цилиндра (или кругового цилиндра, аппроксимируемого параболическим с радиусом кривизны при вершине $R = \hat{Z}_c/(B + \alpha^2)$) и кубической параболы. Учет членов с более высокими порядками усиливает асимметрию разложения. Значения коэффициентов разложения и радиусов кривизны приведены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты разложения некруговых цилиндрических поверхностей

Сечение	X^2	X^3	R , мм
Эллипс	0,000098	0,000000311	5099,19
Парабола	0,000055	0,000000264	9089,36

Выбор заготовок

Для обоснования выбора заготовок был проанализирован припуск на обработку от плоскости и от круговых цилиндров. На рис. 1 показано распределение по длине образующей оптимизированного припуска для эллиптического и параболического цилиндров. Видно, что в соответствии с разложением (10) припуск от плоскости имеет вид квадратичной параболы, а от круговых цилиндров – кубической параболы.

Припуск, мкм

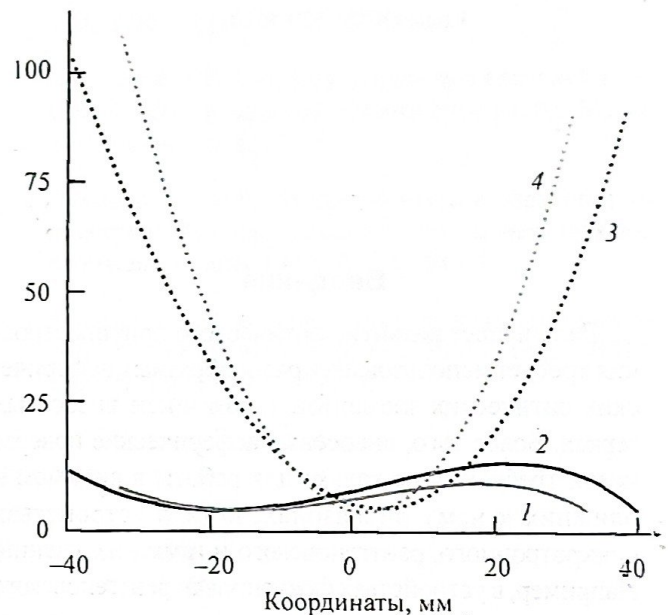


Рис. 1. Распределение отступлений эллиптического (1, 4) и параболического (2, 3) цилиндров от плоскости (3, 4) и круговых цилиндров (1, 2).

Анализ припуска показывает, что для асферизации* целесообразно использовать круговые цилиндры, припуск от которых составляет 6,3 и 10,9 мкм. Технически асферизация может быть выполнена и от плоскости, но величина припуска, а соответственно, и трудоемкость в 10–15 раз выше.

Заметим, что стандартное определение ближайшего базового радиуса заготовки [1] в данном случае не пригодно – если центр ближайшей окружности будет находиться на оси асферической поверхности, ее радиус будет определен в 33,3 мм для эллиптического цилиндра и в 40,28 мм для параболического. Для сравнения в табл. 3 приведены зна-

* Авторы понимают, что использование здесь и далее термина асферизация, применяемого для определения процесса изготовления асферической поверхности из сферической, не является строгим, но тем не менее не готовы вводить новые термины типа ацилиндрации или акруглизации для определения процесса изготовления асферической поверхности (некругового цилиндра) из асферической (кругового цилиндра).

Таблица 3. Радиусы кривизны фрагментов эллиптического и параболического цилиндров (выраженные в миллиметрах).

Цилиндр	Левый край	Центр	Правый край
Эллиптический	3341,9	5100,4	6479,5
Параболический	4391,9	9093,3	14812,3

чения радиусов кривизны цилиндрических поверхностей на краях и в центре фрагментов. Видно, что рассчитанные “ближайшие” радиусы существенно отличаются от радиусов кривизны.

Для определения радиуса действительно ближайшей базовой поверхности была разработана методика, основанная на минимизации объема остающегося припуска для обработки. Такой подход определил для эллиптической поверхности ближайший радиус в 4980,891 мм, а для параболической – в 7802,835 мм. Эти радиусы хорошо согласуются с данными таблиц 2 и 3, но не совпадают точно с радиусами кривизны ни в центрах фрагментов, ни в областях нулевого припуска (при расчете оптимального припуска учитывалась не только величина радиуса ближайшего кругового цилиндра, но и положение его в пространстве).

Обработка

Для обработки выпуклых круговых цилиндрических заготовок были изготовлены вогнутые круговые цилиндрические инструменты. Обработка велась методом притира, причем направление осей цилиндров строго выдерживалось.

Контроль формы заготовок проводился на координатно-измерительной машине “OPTON”. Результаты измерений координат обрабатывались на компьютере.

Полирование круговых цилиндров проводилось по аналогичной системе.

Асферизация цилиндров проводилась на автоматизированных доводочных станках типа АД [2, 3],

разработанных НПО “Оптика”. Для обработки применялись наборы малых инструментов диаметром до 30 мм, а также полноразмерные инструменты.

Основанием для проведения обработки являлась топография припуска в формате АД. По топографии рассчитывались траектории движения выбранных инструментов, устраняющих заданный припуск, формировались управляющие файлы для ЧПУ. Далее на станках с ЧПУ велась обработка по заданным траекториям.

По завершении сеанса обработки проводился промежуточный технологический контроль формы поверхности, формировалась новая топографическая карта припуска, и сеанс обработки повторялся. При необходимости использовались другие наборы инструментов.

Технологический контроль формы поверхности проводился с использованием интерференционных средств. Контроль линейной и некруговой образующих проводился независимо друг от друга. Линейная образующая цилиндров контролировалась на интерферометре ИТ-100, для контроля некруговых образующих выпуклых цилиндров применялась разработанная для этих целей интерференционная система бокового сдвига. Формируемые интерференционные картины наблюдались визуально и фиксировались на фотоносителе с последующей обработкой.

Система юстировки интерферометра позволяла формировать интерференционную картину с полосами произвольной ориентации, однако для работы применялась ориентация полос только вдоль и поперек некруговой образующей. На рис. 2 для примера приведены сдвиговые интерференционные картины выпуклого эллиптического цилиндра с продольной и поперечной ориентациями полос на промежуточном этапе обработки.

Для обработки сдвиговых интерферограмм было разработано программное обеспечение, позволяющее по сдвигу реконструировать реальные отклонения топографии поверхности. Программное обеспечение работало как с продольной, так и с поперечной ориентациями интерференционных полос.

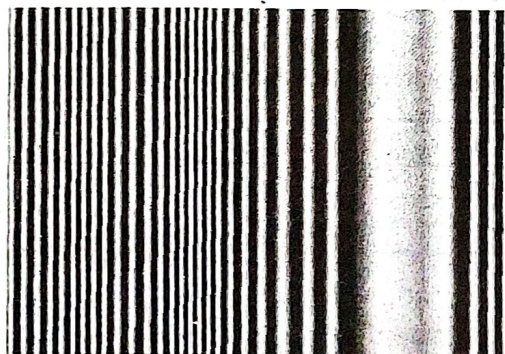


Рис. 2. Интерферограммы бокового сдвига для эллиптического цилиндра на промежуточной стадии обработки с продольной и поперечной ориентациями полос.

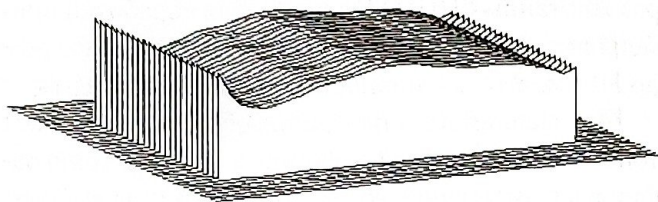


Рис. 3. Распределение припуска для параболического цилиндра на промежуточном этапе обработки.

Например, поперечная ориентация позволяла получать выборку данных строго вдоль одного выбранного некругового сечения, однако объем этой выборки был ограничен числом полос, что влияло на точность интегрирования. При использовании продольной ориентации полос объем выборки данных вдоль полосы мог быть значительно больше, но результат интегрирования определялся набором различных некруговых сечений, перекрываемых полосой. Наилучший результат достигался по совокупности данных.

Рассчитанные фактические отклонения поверхности сравнивались с ожидаемыми, и формировалась топография припуска. Более того, в программе учитывалось, что в общем случае центр сдвиговой интерферограммы может не совпадать с центром фрагмента, поэтому выполнялся поиск наилучшего положения поверхности. На рис. 3 для примера приведена топография промежуточного припуска для доводки поверхности выпуклого параболического цилиндра.

Результаты работы

В результате проведенной работы были изготовлены внеосевые фрагменты эллиптического и параболического цилиндров оптического качества. Шероховатость полученных поверхностей была около 10 ангстрем. Параметры точности формы полученных поверхностей приведены в табл. 4.

Учитывая, что реплики с полученных оптических поверхностей предназначались для работы в коротковолновых диапазонах, для уменьшения потерь на рассеяние особое внимание обращалось на

Таблица 4. Параметры полученных поверхностей эллиптического и параболического цилиндров

Цилиндр	Размах, мкм	СКО, мкм
Эллиптический	0,1317	0,0324
Параболический	0,3353	0,0875

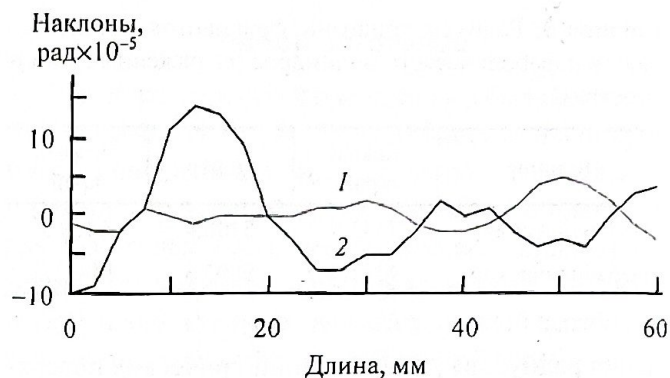


Рис. 4. Распределение наклонов микронеровностей поверхностей по нелинейным образующим цилиндров. 1 – эллиптический, 2 – параболический.

градиент ошибки формы полученных поверхностей. На рис. 4 приведены графики распределения наклонов по нелинейным образующим эллиптического и параболического цилиндров. Как видно из графиков, максимальный наклон неровностей не превышает 5×10^{-5} рад для эллиптического цилиндра и 14×10^{-5} рад для параболического цилиндра.

Выводы

На примере изготовления выпуклых матриц для производства вогнутой асферической рентгеновской оптики изучены особенности изготовления внеосевых фрагментов эллиптического и параболического цилиндров, отработаны элементы технологии автоматизированной асферизации и доводки формы.

Разработана система интерференционного контроля выпуклых внеосевых асферических цилиндрических поверхностей с программным сопровождением обработки данных и представления рассчитанных результатов.

Получены фрагменты выпуклых внеосевых асферических цилиндрических поверхностей оптического качества с высокими эксплуатационными свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник технолога-оптика / Под ред. Кузнецова С.М. и Окатова М.А. Л.: Машиностроение, 1983. 415 с.
2. Лямин Ю.Б., Рябинин В.А. Автоматизированные доводочные станки модели АД// ОМП. 1987. № 7. С. 31–33.
3. Лямин Ю.Б. Автоматизированный доводочный станок модели АД-250 // Оптический журнал. 1994. № 6. С. 68–69.