

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СЛОЖНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

7.1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЛОЖНЫХ ДЕТАЛЕЙ

К группе сложных оптических деталей относятся такие детали, конфигурация или форма поверхностей которых имеет существенные особенности, а для их изготовления требуются специализированное оборудование и более сложные методы обработки и управления процессом. В первую очередь к ним относятся детали с асферическими поверхностями, для изготовления которых применяют разнообразные нетрадиционные методы. Это обусловлено главной особенностью асферических поверхностей — изменением их кривизны по меридиональному сечению, в отличие от сферических поверхностей, кривизна которых постоянна. Иногда в оптических приборах используют такие асферические поверхности, кривизна которых немонотонна, т. е. меняет свой знак в пределах сечения один или несколько раз.

К сложным оптическим деталям относят также детали для астрономических приборов (из-за особо высоких требований к качеству поверхностей); детали крупногабаритных оптических систем, для получения которых требуется применение специальных приемов и оборудования; детали волоконной оптики, поскольку микроучастки поверхности волоконной оптической детали различны по своим физико-механическим свойствам; детали, на поверхности которых наносят какой-либо рисунок — шкалы и сетки; оптические детали из полимерных материалов ввиду специфичности их производства; детали шаровидной формы и некоторые другие.

7.2. ДЕТАЛИ С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

Все применяемые в оптических системах асферические поверхности можно разделить на две основные группы: 1) поверхности вращения, имеющие оси симметрии; 2) поверхности, обладающие двумя плоскостями симметрии либо не имеющие симметрии вообще.

В подавляющем большинстве случаев применяемые в настоящее время асферические поверхности относятся к 1-й группе. Общее уравнение меридионального сечения такой асферической поверхности вращения обычно имеет вид ряда

$$y^2 = F(x) = A_1x + A_2x^2 + A_3x^3 + \dots + A_nx^n. \quad (7.1)$$

Для технологов такое выражение уравнения наиболее ценно, так как несет максимум полезной информации о поверхности и ее особенностях. Эту форму уравнения используют и при составлении программ для расчета технологических параметров асферических поверхностей, необходимых для их изготовления и контроля.

В случае немонотонной функции профиль поверхности описывают в виде ряда

$$x = F(y) = A_1 y^2 + A_2 y^4 + A_3 y^6 + \dots + B_1 |y| + B_2 |y|^3 + \dots \quad (7.2)$$

Поверхности, мало отличающиеся от сферы, часто описывают уравнением в полярной системе координат [7.22]:

$$R = R_0 + A_1 \varphi^2 + A_2 \varphi^4 + A_3 \varphi^6 + \dots, \quad (7.3)$$

где R_0 — радиус-вектор вершины кривой; φ — полярный угол точки профиля.

В иностранных патентах встречаются и иные формы записи профиля поверхности, например

$$x = \left[(y^2 r) / (1 + \sqrt{1 - (1 + e) y^2 / r^2}) \right] + \sum A_i y^{2i} + \sum B_i |y|^{2i-1}, \quad (7.4)$$

где r — радиус кривизны поверхности в ее вершине; e , A_i , B_i — постоянные, определяющие данный конкретный вид поверхности.

К асферическим поверхностям, описанным уравнением (7.1), относятся все поверхности вращения второго порядка (коникоиды), поверхности коррекционных пластин типа Шмидта и др. Для поверхностей вращения второго порядка коэффициенты определяются соответственно по формулам:

$$A = 2P; \quad A_2 = (1 - e^2); \quad A_3 = A_4 = \dots = A_n = 0,$$

где $P = b^2/a$; $e = c/a$ ($c = \sqrt{a^2 - b^2}$; a — большая, b — малая полуоси поверхности).

В зависимости от значения e^2 коникоиды подразделяются на параболоиды ($e^2 = 1$), эллипсоиды ($e^2 < 1$) и гиперboloиды ($e^2 > 1$).

Из группы поверхностей, описанных уравнением (7.2), достаточно широко применяются конические поверхности вида $x = B|y|$.

Вращением любой плоской кривой вокруг одной из нормалей в некоторой точке кривой, когда нормаль не является осью симметрии этой кривой, можно получить новый вид асферических поверхностей [7.1]. Диаметральное сечение таких поверхностей может быть описано уравнением

$$x = A_1 y^2 + B_2 |y|^3 + \dots + B_n |y|^{2n-1} + A_n y^{2n} + \dots, \quad (7.5)$$

при этом ось Ox является оптической осью поверхности.

Из поверхностей 2-й группы находят применение торические, цилиндрические и некоторые другие поверхности.

Асферические поверхности целесообразно классифицировать с учетом их назначения, технологических показателей, методов обработки и контроля.

К технологическим показателям относятся:

1) наружный (световой) диаметр $D_{\text{св}}$, мм, и внутренний (также световой) диаметр $d_{\text{св}}$, мм, если последний имеется (отверстие);

2) уравнение меридионального профиля поверхности и ее знак (например, выпуклые и вогнутые параболоиды, поверхности высших порядков, знакопеременные поверхности, цилиндры, торы, конические поверхности и т. п.);

3) крутизна поверхности, измеряемая углом $\varphi_{\text{с}}$ между касательными к образующей поверхности в зоне светового диаметра и к вершине поверхности;

4) точность формы поверхности, определяемая:

а) по местным ошибкам, т. е. по углу α отклонения нормалей к фактической поверхности от нормалей к расчетной в тех же точках поверхности и по линейным отклонениям фактической поверхности от расчетной, выраженной в микрометрах или в долях длины световой волны λ (ΔN в зоне шириной Δy); указанные угловые ошибки связаны с отклонениями фактических координат поверхности от расчетных следующей зависимостью:

$$\alpha = (\Delta x_n - \Delta x_{n-1}) (\cos^2 \varphi) / (y_n - y_{n-1}),$$

где α — отклонение нормали; Δx_n , Δx_{n-1} — отклонения координаты x в зонах y_n и y_{n-1} ; φ — крутизна поверхности для середины зоны $y_n - y_{n-1}$;

б) по плавности поверхности, т. е. плавность изменения α по длине дуги поверхности (например, $\Delta \alpha$ на длине дуги в 1 мм);

в) по общим ошибкам, т. е. по отклонению параметров уравнения меридионального профиля асферической поверхности (например, допуск на параметр параболы поверхности в процентах, допуск на коэффициенты при x и т. д.);

5) асферичность поверхности — наибольшее отступление поверхности от сферы или плоскости; в зависимости от выбора сферы сравнения различают асферичность от сферы ближайшего радиуса (сферы, проходящей через вершину поверхности и окружность светового диаметра); вершинную асферичность — отступление от сферы с радиусом, равным радиусу кривизны асферической поверхности при ее вершине; могут быть выбраны и другие сферы сравнения, но при этом обязательно должен быть указан способ выбора такой сферы;

6) градиент асферичности γ — наибольшее изменение асферичности на длине дуги образующей, равной 1 мм;

7) конструктивные особенности деталей (линз, зеркал, деталей кольцевых, внеосевых и др.);

8) серийность производства детали.

7.3. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С АСФЕРИЧЕСКИМИ ПОВЕРХНОСТЯМИ

7.3.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В чертеже оптической детали для асферической поверхности дополнительно указывают основные технологические показатели, определяющие возможность и целесообразность конкретного процесса асферизации с помощью тех или иных методов изготовления и видов производственного и контрольного оборудования. Эти показатели указаны в п. 7.2.

На рис. 2.16 дан пример оформления чертежа детали с асферическими поверхностями. В табл. 7.1 приведены сведения для выбора рациональных методов изготовления и контроля асферических поверхностей в зависимости от их технологических показателей. Формулы для расчета технологических показателей применительно к четырем случаям уравнения образующей приведены в табл. 7.2.

Детали с асферическими поверхностями могут быть изготовлены следующими методами:

1) съема излишнего слоя от исходной сферической поверхности заготовки точением поверхности одиночным резцом или алмазным инструментом на прецизионных станках с числовым программным управлением; механизированной ретушью малым инструментом с периодическим контролем формы асферической поверхности, взаимной притиркой инструмента-маски (притирка по поверхности) или ножевого инструмента (притирка по линии) или испарением слоя при воздействии пучком ионов в вакууме;

2) наращивания асферического слоя на исходной сферической поверхности заготовки с помощью конденсации вещества в вакууме или слоя полимеризации мономера в форме;

3) перераспределения материала заготовки термопластичным формованием стекломассы, моллированием исходной сферической поверхности, прессованием или литьем органических сред под давлением.

Указанные способы асферизации имеют свои особенности, преимущества и недостатки. Выбор конкретно какого-либо из них зависит от многих факторов и прежде всего от требуемой точности изготовления детали.

Наиболее экономически целесообразными в массовом производстве являются методы термопластичного формования стекломассы и полимеризации из пластических материалов. Но пока таким методом могут быть изготовлены только детали с невысокими требованиями к точности поверхностей. Основной его недостаток — искажение поверхности деталей из-за усадки материала во время полимеризации или прессования.

Таблица 7.1.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Точность поверхности	Основные технологические показатели							Обозначение на чертеже	Метод	
	Вид поверхности	Диаметр свеговой, мм	Крутизна на φ , °	Допусковые местные ошибки (а)	Вершинная (А) или сателлитная (а) асферичность, мкм	Градиент асферичности γ , мкм/мм	Р		технологический	контроля
Особо высокая	Вогнутая*	20–300					РШ-1	Ручная и механизированная ретушь	Теневой и интерференционный метод с применением коллиматоров и компенсационных объективов и голограмм. Изменение кружка наименьшего рассеяния	Голографическим интерферометром асферическими пробными стеклами
	Параболоид*	300–1000					РШ-2			
	Вогнутая*	20–300					РШ-3			
	Эллипсоид*	300–1000					РШ-4			
	Выпуклая*	20–300	Не нормируется				РШ-5			
	Гиперболоид*	300–1000					РШ-6			
	Пластинка Шмидта*	20–1000					РШ-7			
Высокая	Выпуклые и вогнутые поверхности вращения любого порядка	50–250	30	10"	До 150	5,0	У-1	Метод упругого инструмента	По стрелкам на сферометре ИЭС-7, асферическими пробными стеклами	Голограммы
	Выпуклые и вогнутые поверхности вращения любого порядка	10–300	30	10"	До 30	5,0	И-1	Метод ионной обработки	Интерференционный метод с применением компенсационных объективов и (или) синтезированных голограмм	

Высокая	Зеркало асферическое любого порядка	30-70	20	20"	Отступление от ближней сферы до 5 мкм	1,0	В-1	Асферизация методом вакуумного напыления монооксида кремния	При помощи фотометрической системы	Голографическим интерферометром АТГ с применением синтезированной голограммы
		50-250	30	30"	Отступление от ближней сферы до 15 мкм	1,0	В-2	Асферизация методом вакуумного напыления сернистого цинка	По пластинкам с помощью УФ-206	
		50-150	30	30"		1,0	В-3	Асферизация методом вакуумного напыления меди с подслоем титана	Вакуумным интерферометром ВИ-1	
Средняя	Параболоид	20-250	45	0,5-6,0'	—	—	Н-1	Метод взаимного притира с применением поступательного движения ножа	Шаблонами и сферометрами ИЭС-7, ИЭС-8 и накладными	Асферометром ЮС-51 (для $\varnothing \leq 150$), сферометром (для $\varnothing > 150$); танковой; контроль в системе
		20-100 20-100	45 35	1-8' 2-10'	Не нормируются	Н-2 Н-3	Метод взаимного притира с применением качающегося ножа			

Продолжение табл. 7.1

Точность поверхности	Основные технологические показатели						Обозначение на чертеже	Метод	
	Вид поверхности	Диаметр световой, мм	Кривизна φ , °	Допуск-емые местные ошибки (с)	Вершинная (А) или сателлитная (а) асферичность, мкм	Градиент асферичности γ , мкм/мм		заготовки	технологический контроль
Ниже средней	Выпуклая поверхность вращения любого порядка*	20–200	45	5–10'	Не нормируются	К-2	Метод копирования с применением станка АШМА (полирование сулконное)	Шаблонами	Контроль в системе
		20–500	45	30'				Контроль под шаблон	
Особая	Выпуклая поверхность вращения любого порядка*	20–80	50	5–10 ^{***}	Не нормируются	М-2	Прессование	Накладной сферометр	Контроль в оптической системе
		5–200	90	2'				Метод взаимного притира	Контроль под пробные стекла
		5–200	20	5'					
	Круговой цилиндр* Круговой конус* Круговой тор*	5–200	20	1'		П-1 П-2 П-3			

* Данные являются ориентировочными и подлежат уточнению (в необходимых случаях) с предприятием-изготовителем. ** Достигнута зарубежными фирмами точность изготовления составляет от 10⁰ до 1 [7.2].

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Таблица 7.2.

Показатель	Обозначение	Параболоид	Эллипсоид и гиперболоид	Асфероид типа x^n	Асфероид типа y^n
Уравнение	—	$y^2 = 2px$	$y^2 = 2px + qx^2$	$y^2 = 2px + qx^2 + S_3x^3 + \dots + S_nx^n$	$x = t_2y^2 + t_4y^4 + \dots + t_ny^n$
Круглизна	φ_c	$\frac{D_c}{2p}$ $\text{tg } \varphi_c = \frac{D_c}{2p}$	$\text{tg } \varphi_c = \frac{D_c}{2p + 2qx_c}$	$\frac{D_c}{2p + 2qx_c + \dots + nS_nx_c^{n-1}}$	$\text{tg } \varphi_c = 2t_2y_c + \dots + nt_ny_c^{n-1}$
<i>Сплошные поверхности</i>					
Радиус вершинной сферы	R_1	$R_1 = p$			
Радиус трехточечной сферы	R_3	$R_3 = p + \frac{x_c}{2}$	$R_3 = p + \frac{e^2x_c}{2}; (e^2 = q + 1)$	$R_3 = \frac{y_c^2}{2x_c} + \frac{x_c}{2}$	$R_1 = 1/2t_2$
Асферичность вершинная	A_1	$A_1 = \frac{x_c^2}{2p}$		$A_1 = \sqrt{(R_1 - x_c)^2 + y_c^2} - R_1$ (при $t_2 = 0, A_1 = x_c$)	
Асферичность трехточечная	a_3		$a_3 = R_3 - \sqrt{(R_3 - x)^2 + y^2} = x(x_c - x)/2R_3$, где $y = 1, 2, 3, \dots, y_c$ (всего 10 - 20 зон)		
Градиент вершинной асферичности	γ_1	$\gamma_1 = \frac{\text{tg}^3 \varphi_c}{2}$		$\gamma_1 = \arcsin \frac{y_c}{R_1 + A_1} - \varphi_c$	
Градиент трехточечной асферичности	γ_3	$\gamma_3 = \frac{\gamma_1}{2}$		$\gamma_3 = \frac{a_3n - a_3(n-1)}{y_n - y_{n-1}}$	

Показатель	Обозначение	Параболоид	Эллипсоид и гиперболоид	Асфероид типа x^n	Асфероид типа y^n
<i>Кольцевые и внеосевые поверхности</i>					
Радиус сагиттальной сферы	R_2	$R_2 = \frac{p}{\cos \varphi_N}$	$R_2 = \frac{p + qx_N}{\cos \varphi_N}$		$R_2 = \frac{y_N}{\sin \varphi_N}$
Радиус четырехточной сферы	R_4		$y_M = \frac{y_N + y_{c-1}}{2}$, $2f = \sqrt{L_x^2 + L_y^2}$; $R_4 = \sqrt{g^2 + f^2}$, где $x_M = \frac{x_N + x_c}{2}$; $g = 2f \cdot y_M / L_x$; $L_x = x_c - x_N$; $L_y = y_c - y_N$		
Асферичность четырехточечная	a_4		$a_4 = R_4 - \sqrt{(x_0 - x)^2 + y^2}$, где $x_0 = x_M + \sqrt{g^2 - y_M^2}$; $y = y_N, y_{N+1} \dots y_{c-1}, y_c$ (всего 10 - 20 зон)		
Градиент сагиттальной асферичности	γ_2		$\gamma_2 = \arcsin \frac{y_c}{R_2 + A_2} - \varphi_c$		
Градиент четырехточной асферичности	γ_4		$\gamma_4 = \frac{a_{4n} - a_{4(n-1)}}{y_n - y_{n-1}}$		
Асферичность сагиттальная	A_2		$A_2 = \sqrt{(R_2 \cos \varphi_N - L_x)^2 + y_c^2} - R_2$		

7.3.2. МЕТОДЫ НАНЕСЕНИЯ СЛОЯ

Асферизирующий слой на стеклянную заготовку наносят путем копирования асферической, имеющей обратную кривизну, поверхности эталона [7.3]. Сущность метода заключается в заполнении пространства между сферической поверхностью заготовки (подложки) и асферической поверхностью эталона синтетической смолой. После полимеризации эталон отделяют от готовой детали, на слое смолы которой остается отпечаток асферической поверхности. Таким путем можно осуществлять формирование параболических, торических и других видов поверхностей зеркал и линз средней точности (точность по кружку наименьшего рассеяния до 0,05 мм) при максимальном значении асферичности до 40 мкм.

Для изготовления точной асферической оптики ($\Delta N = 0,2 + 0,5$, асферичность до 200 мкм), работающей в проходящем свете, используется современный метод копирования асферического полимерного слоя на подложке из силикатного стекла (подобно описанному в п. 7.10).

Наиболее трудным в методе копирования является изготовление точных эталонных поверхностей. Для эталонов применяют стекло или сталь (предпочтительнее сталь ввиду ее большей стойкости к разрушению в процессе отделения детали от эталона). Точность изготовления поверхности эталона и подложки определяется требованиями к изготавливаемым деталям.

Для получения асферизирующего слоя применяют клеи — материалы на основе полиэфирной или эпоксидной смолы. На рис. 7.1, а — г показана последовательность процесса копирования при изготовлении асферического зеркала. Сначала производится подготовка (рис. 7.1, а) копируемой поверхности эталона 1, на которую наносят разделительный (растворимый) 6 и отражающий (зеркальный) 5 слой, а также слой 4 вещества, повышающего адгезию. Это вещество 4 наносят также и на рабочую поверхность заготовки 2. После подготовки поверхностей производят склеивание (рис. 7.1, б), непосредственно перед которым на поверхность заготовки с адгезионным слоем наносят слой клея 3 (синтетической полимеризующейся смолы). После склеивания и полимеризации эталон 1 по разделительному слою 6 отделяют от детали (рис. 7.1, в). Окончательная стадия процесса заключается в удалении слоя 6 с по-

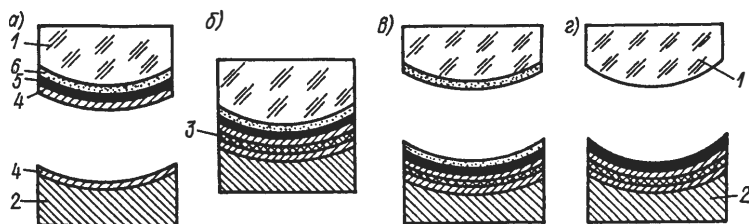


Рис. 7.1. Последовательность процесса копирования

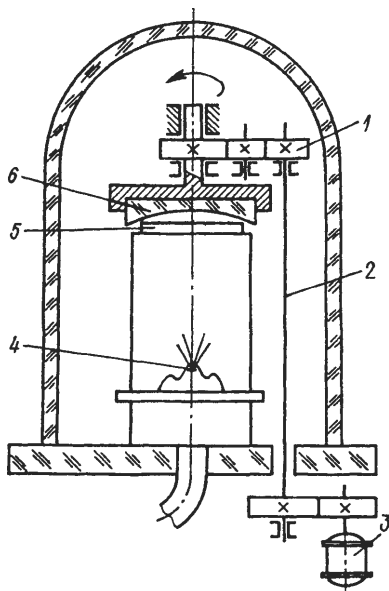


Рис. 7.2. Установка для асферизации вакуумным методом

верхности эталона 1 и с поверхностью готовой детали, в которую превратилась заготовка 2, с помощью нанесения асферизирующих слоев 3–5 (рис. 7.1, 2).

Асферические поверхности, имеющие малые отступления от сферы или плоскости, могут быть изготовлены также нанесением тонких отражающих или преломляющих слоев на исходные соответствующие поверхности вакуумным методом [7.82]. Асферизация сферической или плоской поверхностей вакуумным методом заключается в нанесении напылением дополнительного слоя переменной толщины из алюминия, монооксида кремния, сульфида цинка и др. Распределение толщины дополнительного слоя определяется формой наносимой поверхности и формой поверхности заготовки. Асферизация производится в вакуумных установках (рис. 7.2). В испаритель

4 помещается наносимое вещество. Между испарителем и поверхностью заготовки 6 на малом расстоянии от последней устанавливается маска-экран 5 с фигурным вырезом. Контур фигурного выреза маски определяется формой получаемой поверхности или, точнее, функцией распределения толщины наносимого слоя. Для получения поверхностей второго порядка из поверхности сферы ближайшего радиуса уравнение контура маски в полярных координатах имеет вид

$$\varphi = 4\varphi_{\max} (\rho/\rho_{\text{кр}})^2 [1 - (\rho/\rho_{\text{кр}})^2],$$

где φ_{\max} — максимальный угол раскрытия маски; $\rho_{\text{кр}}$ — крайний радиус-вектор маски.

При асферизации заготовку вращают с помощью электродвигателя 3 через систему валов 2 и шестерен 1.

Методом вакуумной асферизации в настоящее время получают поверхности с точностью по угловым ошибкам до $10''$ при толщине слоя до 5 мкм и с точностью до $30''$ при толщине слоя до 15 мкм. Э. С. Путилиным [7.4] разработан метод «безмасочной» асферизации путем осаждения вещества в вакууме, позволяющий производить напыление асферизирующего слоя переменной толщины до 50 мкм и сохраняющий высокое качество отражающей поверхности.