

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2004 г. В. А. Горшков, канд. техн. наук; А. Ю. Папаев; А. В. Подобрый, канд. техн. наук
НПО "Оптика", Москва
E-mail: Optica@mail.cnt.ru

Рассмотрены основные составляющие элементы автоматизированной технологии изготовления высокоточной асферической, в том числе внеосевой, оптики. Приведены характеристики станочного парка, системы управления станками, метрологического парка, программного обеспечения. Приведены параметры ряда внеосевых асферических зеркал, изготовленных с использованием автоматизированной технологии.

Коды OCIS: 220.1250, 220.4610.

Поступила в редакцию 07.07.2004.

Введение

Дальнейшее развитие оптического приборостроения, и в первую очередь разработка современных телескопов наземного и космического базирования, направлено на увеличение разрешающей способности и светосилы, увеличение входной апертуры при одновременном уменьшении габаритов изделия. Вариантом решения поставленных задач является использование асферической оптики.

В настоящее время в ряде стран реализуются проекты по созданию телескопов с составными главными зеркалами диаметром до 25 м и даже до 100 м. В этих случаях отдельные сегменты являются внеосевыми асферическими зеркалами, геометрические размеры которых достигают 1500 мм, а асферичность – нескольких сотен микрон. Например, проект GRANTECAN (Испания) [1] предполагает использование десятиметрового гиперболического зеркала, составленного из 36 внеосевых фрагментов.

Внеосевые оптические зеркала также применяются в коллиматорах синхротронных излучателей, так как их использование значительно упрощает конструкцию. Система фокусировки проекта ELETTRA (Италия) [2] основана на комбинации плоского и внеосевого эллиптического зеркал.

В отечественных разработках асферическая и внеосевая асферическая оптика применяется более сдержанно. Отказ от ее использования закладывается еще на этапе проектирования, поскольку известно, что производство такой оптики крайне длительный и трудоемкий процесс.

НПО "Оптика" в течение ряда лет занимается созданием и совершенствованием технологии автоматизированного формообразования асферической, и в том числе внеосевой, оптики [3]. Целью настоящей работы является описание элементов и возможностей разработанной технологии и некоторых результатов ее применения.

Общее описание технологии

Разработанная технология автоматизированного формообразования оптических поверхностей базируется на трех основных составляющих: станочный парк, метрологический парк и программное обеспечение. Более того, все три составляющие технологии переплетены друг с другом, образуя единую инструментальную систему, основное назначение которой – достижение наивысшей точности обработки автоматизированным методом любых по сложности формы монотонных оптических поверхностей.

Сущность автоматизированного формообразования можно выразить следующей технологической цепочкой: контроль формы поверхности, приведение данных к стандартизированному цифровому виду, выбор инструментов и расчет вариантов обработки, реализация найденных решений на станках и снова контроль формы поверхности. Данный цикл может повторяться до достижения требуемых параметров поверхности.

Станочный парк

Станочный парк базируется на разработанных НПО "Оптика" автоматизированных доводочных станках серии АПД, которые условно можно отнести к двум типам: с трехкоординатной и пятикоординатной системами управления. Работа осуществляется малоразмерным полировальным инструментом, перемещаемым по траектории в соответствии с управляющей программой.

Для автоматизированного формообразования оптических поверхностей с апертурой до 1:2,5 применяются станки первой группы – АПД-1000 и АПД-2000. Конструктивно станки АПД-1000 и АПД-2000 однотипны, построены по блочной компоновочной схеме с высокой степенью унификации.

Для обработки поверхностей с апертурой до 1:1 применяются станки второй группы – АД-250, АПД-

Таблица 1. Технические характеристики станков

Параметр	АД-250	АПД-1000	АПД-1000В	АПД-2000	АПД-500
Диаметр обрабатываемой детали, мм, не более	250	1000	1000	2000	500
Частота вращения шпинделя, об/мин	4-1000	5-200	5-200	5-200	Нижний шпиндель 4-40 Верхний шпиндель 5-200
Наибольший ход по координатам					
X, мм	330	1000	1300	2050	950
Y, мм	250	1100	1300	2050	800
Z, мм	140	130	210	130	230
B, град	90	—	90	—	45
C, град	360	—	360	—	360
Амплитуда осцилляции, мм	17,5	35	35	35	35
Сила прижима инструмента, Н	0,2-60	5-500	5-500	5-500	Полноразмерный инструмент 1000 Малый инструмент 5-500
Габариты станка:					
длина, мм	950	2800	2600	4000	1700
ширина, мм	930	2200	2200	3400	2100
высота, мм	1750	2100	1900	2100	2200

500 и АПД-1000В. Станки оснащены поворотными столами, а также имеют возможность наклонять при обработке деталь или инструмент. Особенность станка АД-250 [4] – компоновка по консольной схеме.

Технические характеристики станков приведены в табл. 1.

Принятые компоновки станков АПД-1000 и АПД-2000 позволяют вести обработку деталей в прямоугольной трехкоординатной системе на неподвижном изделии. В станках АД-250 и АПД-1000В деталь может вращаться, поэтому помимо прямоугольной можно использовать также полярную систему координат.

Станок АПД-500 сочетает в своей конструкции возможность вести обработку по традиционной схеме притиром как полноразмерным или масочным инструментом, так и малым инструментом по координатной системе.

Система управления станками

Система управления станками построена на базе промышленного компьютера (промышленной рабочей станции) AWS-825, в который установлены модули ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов и модуль декодера. Компьютеры соединены с электроприводами Lenze, обеспечивающими вращение двигателей станков. Все системы управления станками смонтированы в шкафах Rittal.

Система управления станками построена так, что станки не имеют какой-либо панели управления. Все управление станком осуществляется через компьютер с помощью разработанного программного обеспечения.

Программное обеспечение позволяет со стандартной клавиатуры компьютера (или промышленной

клавиатуры рабочей станции) выполнять включение/выключение станка, включение/выключение отдельных шпинделей или движений. В программе заложена возможность работы со станками как в ручном, так и в автоматическом режимах. В ручном режиме, например, по управляемым координатам можно задавать перемещения в относительных или абсолютных значениях или просто перемещать поводок, удерживая нажатой одну из клавиш.

В автоматическом режиме работа проходит в соответствии с программой, внешний управляющий файл которой содержит функции из стандартного набора ISO. Программа интерпретирует команды управляющего файла, преобразуя его к внутреннему формату программы. Далее в соответствии с заданными командами станок включает требуемые скорости шпинделей, а также осуществляет обработку перемещений по управляемым координатам.

Заметим, что разработанное программное обеспечение является универсальным и применимо ко всем типам станков. Программа успешно работает как в декартовой, так и в полярной системах, управляя 1-6 координатами.

Вакуумно-доводочный комплекс

К станочному парку можно отнести универсальный вакуумно-доводочный комплекс, созданный на базе вакуумной установки ВУ2М и предназначенный для автоматизированного формообразования оптических поверхностей ионно-лучевым методом. Применяются широкоапертурные ионные источники типа ИЛО-200 в совокупности с масочным инструментом, а также малоразмерные источники типа ИЛО-50, перемещаемые по координатам в соответ-

Таблица 2. Технические характеристики вакуумно-доводочного комплекса

Диаметр обрабатываемых деталей, мм	20–350
Обрабатываемые поверхности	Сферические, плоские, асферические любого порядка (в т.ч. внеосевые)
Погрешность обработки по критерию СКО	$\lambda/30$ – $\lambda/60$ ($\lambda = 0,6328$ мкм)
Диаметр ионного пучка, мм	20–200
Максимальная плотность ионного пучка, мА/см ²	2,0
Потребляемая мощность, кВт	3,0
Площадь, занимаемая вакуумным комплексом, м ² , не более	6,0
Масса, кг	1970

ствии с заданной программой. Технические характеристики комплекса приведены в табл. 2.

Интерференционные средства контроля

Метрологический парк включает в себя инфракрасный интерферометр ИКИ, а также интерферометры ПИКА, ПИК-ПС-300 и МИК (табл. 3).

Для контроля формы шлифованных поверхностей предназначен и инфракрасный интерферометр ИКИ. Интерферометр имеет два встроенных

источника излучения: He–Ne-лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм) для юстировки оптической системы и CO₂-лазер ($\lambda = 10,6$ мкм). В качестве приемника использован пировидикон с выводом информации на монитор для визуального контроля и на компьютер для численного анализа. Из-за большой длины волны излучения интерферометр мало чувствителен к вибрациям, что позволяет применять его непосредственно в цеховых условиях без специальных мер защиты. Данный прибор особенно эффективен при асферизации оптических поверхностей шлифованием до значений асферичности 50 мкм. Погрешность измерений не более $\lambda/20$ (0,5 мкм).

Интерферометр ПИК-ПС-300 является базовым прибором, различные дополнения и модификации которого позволяют решать широкий круг задач. Интерферометр предназначен для контроля плоских и выпуклых сферических поверхностей оптических деталей с диаметром до 300 мм и апертурой 1:4. Прибор может быть использован для контроля вогнутых сферических поверхностей с апертурой 1:6, а также для контроля объективов в параллельном пучке лучей диаметром 400 мм. Основу интерферометра составляет базовый оптико-механический блок, предназначенный для формирования сферического волнового фронта. Базовый блок может быть дополнен внеосевой параболой, преобразующей сферический волновой фронт в плоскопараллельный, эталонной клиновидной пластиной для формирования эталонного плоского опорного волнового фронта, а также

Таблица 3. Технические характеристики интерферометров

Тип интерферометра	Назначение	Технические характеристики
ИКИ	Контроль шлифованных поверхностей оптических деталей	Апертура контролируемых поверхностей 1:6–1:2 Среднеквадратическая погрешность измерения $\lambda/20$ Основная длина волны 10,6 мкм Вспомогательная длина волны 0,6 мкм Метод измерения амплитудный
ПИКА1	Контроль формы асферических поверхностей оптических деталей с применением нуль-корректоров	Диаметр контролируемых деталей от 20 до 3000 мм Относительное отверстие 1:10–1:1 Среднеквадратическая погрешность измерения $\lambda/80$ Программное обеспечение расшифровки интерферограмм – программа Int_to_Top
ПИК-ПС-300	Контроль формы плоских и сферических (вогнутых, выпуклых) поверхностей оптических деталей, контроль качества волнового фронта, формируемого оптическими системами	Диаметр контролируемых поверхностей до 300 мм Относительное отверстие 1:6–1:3 Среднеквадратическая погрешность измерений $\lambda/60$ Программное обеспечение расшифровки интерферограмм – программа Int_to_Top
МИК	Контроль формы сферических и асферических поверхностей, контроль волновых фронтов, формируемых оптическими системами. <u>Специфика:</u> интерферометр в режиме бокового сдвига устойчив к внешним воздействиям	Режим работы – с опорным волновым фронтом, интерференция бокового сдвига Среднеквадратическая погрешность измерений $\lambda/40$ с опорным фронтом, $\lambda/20$ в режиме бокового сдвига Максимальная апертура контролируемых поверхностей до 1:3 Программное обеспечение расшифровки интерферограмм – программа Int_to_Top

эталонной анаберрационной линзой. Интерферометр оснащен фотоэлектрической системой регистрации и состыкован с компьютером.

Интерферометр ПИКА предназначен для контроля формы асферических поверхностей с апертурой до 1:1, имеет рабочий и эталонный каналы. В рабочем канале устанавливаются сменные нуль-корректоры, формирующие требуемый асферический волновой фронт. Интерференционная картина фиксируется электронным способом с дальнейшей компьютерной обработкой. Погрешность измерения по критерию СКО составляет $\lambda/80$.

Интерферометр МИК предназначен для контроля сферических и асферических поверхностей с относительным отверстием до 1:1. Интерферометр не имеет эталонного канала, а интерференционная картина формируется в результате бокового смещения одного из двух одинаковых волновых фронтов, созданных исследуемым объектом. Такая система делает интерферометр устойчивым к внешним воздействиям (вибрации) и может применяться в цеховых условиях. Для реконструкции топографии поверхности исследуемого объекта по сдвиговым данным используется оригинальное программное обеспечение.

Технологическое программное обеспечение

Автоматизированные технологии формообразования прецизионных оптических поверхностей в значительной мере базируются на разнообразном программном обеспечении. Прикладные программы, используемые в технологической системе, образуют комплексный пакет, перекрывающий практически все проблемы, возникающие при автоматизированном формообразовании оптических поверхностей – от проектирования конструкций оптических элементов и оптимальной технологической оснастки до аттес-

тации получаемых поверхностей [5]. Все программы унифицированы, стыкуются между собой по файловому протоколу AD, что позволяет производить обмен данными и результатами расчетов между различными программами.

Различные комбинации прикладных программ могут создавать эффективные технологические решения для изготовления точных оптических поверхностей, в том числе внеосевых асферических. Широкое применение методов математического моделирования технологического процесса автоматизированного формообразования оптических поверхностей, анализа параметров обрабатываемых поверхностей и технологических параметров позволяет анализировать различные варианты обработки на виртуальном уровне и строить оптимальный технологический процесс.

Особенностью разработанных программ является их ориентация на производство в автоматизированном режиме уникальных (по габаритам и форме) оптических поверхностей. Однако в настоящее время большое внимание уделяется разработке программного обеспечения для формообразования серийных оптических деталей. Примерами таких программ являются программа ION для формообразования оптических поверхностей ионным инструментом, работающим как с маской, так и с управляемым перемещением ионного источника по радиальной траектории, и программа OSA [6], предназначенная для проектирования технологического процесса и проведения управляемого формообразования осесимметричных поверхностей при абразивном полировании.

Результаты работ

Созданные компьютерные технологии на базе автоматизированных комплексов позволяют повы-

(а)



Размах = 0,0990 мкм = $0,1565\lambda = \lambda/6,39$
СКО = 0,0111 мкм = $0,0176\lambda = \lambda/56,8$

(б)



Размах = 0,0927 мкм = $0,1465\lambda = \lambda/6,8$
СКО = 0,0108 мкм = $0,0171\lambda = \lambda/58$

Интерферограммы внеосевых параболических зеркал: а – диаметр 203 мм (внеосевой 131 мм), б – диаметр 330 мм (внеосевой 254 мм).

Таблица 4. Параметры внеосевых асферических зеркал

Поверхность	Размеры, мм	Фокусное расстояние, мм	Внеосевой параметр, мм	Точность поверхности $\lambda = 0,6328$ мкм		Материал
				Размах	СКО	
Внеосевой параболоид	Ø 200,0	1000	130	$\lambda/7$	$\lambda/45$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 270,0	1800	240	$\lambda/8,6$	$\lambda/82$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 180,0	1500	330	$\lambda/6,4$	$\lambda/56$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 300,0	2000	250	$\lambda/4$	$\lambda/50$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 330,0	1800	250	$\lambda/8,5$	$\lambda/67$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 330,0	1800	250	$\lambda/7,1$	$\lambda/53$	ЛК-6
Внеосевой параболоид	Ø 380,0	1800	250	$\lambda/7$	$\lambda/61$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 620,0	4200	400		$\lambda/61$	Ситалл
Внеосевой параболоид	Ø 270,0	1200	500	$\lambda/8,2$	$\lambda/56$	Ситалл
Внеосевой эллипсоид	160×280	2A = 7580 2B = 5380	2000	25"	5"	Ситалл
Внеосевой эллипсоид	50×210	2A = 6000 2B = 400	1980	7"	1,5"	Кварц. стекло

сильно повысить эффективность и качество формообразования внеосевых асферических зеркал, обеспечить надежный технологический и аттестационный контроль формы обрабатываемой поверхности во всех диапазонах их типоразмеров, повысить производительность обработки за счет оптимизации параметров формообразования методом математического моделирования с последующим управлением их значениями в реальном времени.

Все это позволяет изготавливать высокоточные внеосевые асферические зеркала с дифракционным качеством изображения, что способствует созданию принципиально новых оптических приборов с повышенными техническими характеристиками.

Экономическая оценка изготовления по разработанной технологии асферических зеркал, в том числе внеосевых, показала, что их себестоимость ниже себестоимости зарубежных аналогов в 2–3 раза.

По разработанной технологии на базе приведенного выше оборудования было изготовлено порядка 150 наименований сложных асферических зеркал диаметром 80–1600 мм, в том числе внеосевых асферических элементов, параметры некоторых из них приведены в табл. 4. Для примера на рисунке приведены интерферограммы двух внеосевых параболических зеркал.

Заключение

Разработанные компьютерные технологии автоматизированного формообразования нельзя считать абсолютно универсальными и полностью завершенными. Они решают только часть задач по изготовлению асферической, в том числе внеосевой, оптики. Необходимо продолжить работу над

созданием технологий изготовления асферической оптики малых размеров, серийной асферической оптики, повышением эффективности и снижением себестоимости изготовления асферической оптики. Для решения поставленных задач необходимы разработка новых точных станков и инструментов для предварительного формообразования асферической оптики, станков с нетрадиционными методами обработки, например, с использованием магнито-реологических жидкостей, систем контроля формы не только оптическими, но и оптико-механическими системами (оптические профилометры), систем контроля для серийного производства асферики, в том числе фазовых интерферометров, а также совершенствование и унификация программного обеспечения.

Исходя из ситуации, сложившейся на рынке востребования асферической оптики различного типоразмера и назначения, необходимо:

- вести дальнейшую модернизацию оборудования и технологических процессов (в том числе нетрадиционных), используя новейшие достижения в области автоматизации;
- создать систему информационного обеспечения фирм (предприятий)-изготовителей асферики;
- создать единый банк данных по технологии производства с целью поддержки оптимальных цен на российском рынке производства асферики.

ЛИТЕРАТУРА

1. www.gtc.iac.es.
2. Sostero G., Cocco D. and Qian S.N. Metrological challenges of Synchrotron Radiation Optics // Proc. SPIE. 1999. V. 3739. P. 310–316.

3. Gorshkov V.A. et. al. Technology of automated shaping of aspherical off-axis mirrors // Proc. SPIE. 1996. V. 2744. P. 267-272.
4. Лямин Ю.Б. Автоматизированный доводочный станок модели АД-250 // Оптический журнал. 1994. № 6. С. 68-69.
5. Горшков В.А., Папаев А.Ю., Подобранный А.В. Программное обеспечение обработки интерферограмм

для технологических целей // Оптический журнал. 2002. № 2. С. 54-59.

6. Горшков В.А., Папаев А.Ю., Подобранный А.В. Программное моделирование и управление процессами автоматизированного формообразования и асферизации осесимметричных поверхностей оптических деталей // Оптический журнал. 2003. № 5. С. 25-30.