

Оптическая система интерферометра для измерения и контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра

Д.Т. Пуряев¹, Н.Л. Лазарева¹, Е.А. Дуденкова²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

² ДООЦ «Центральный», Москва, Россия.

Предложена принципиально новая оптическая система лазерного интерферометра для бесконтактного контроля формы крупногабаритных выпуклых сферических поверхностей без снятия с планшайбы станка. Рабочий волновой фронт формируется объективом, состоящим из стационарного сферического зеркала диаметром 1200 мм и четырех сменных эталон-компенсаторов, диаметры которых составляют менее 120 мм. Волновая aberrация объектива при автоколлимационном ходе лучей не превышает 0,07 длины волны He—Ne лазера.

E-mail: av72399@mail.ru

Ключевые слова: интерферометр, контроль, форма, выпуклая сферическая поверхность.

Оптические предприятия России серийно выпускают крупногабаритные объективы, состоящие из множества линз диаметром свыше 200 мм. Требования к соблюдению формы сферических и плоских поверхностей таких линз достаточно жесткие. Например, допустимые местные, зональные и астигматические погрешности в долях интерференционной полосы составляют порядка 0,1...0,3.

Известно, что все существующие интерферометры для контроля формы выпуклых сферических поверхностей, содержат оптический элемент, который создает сходящийся гомоцентрический пучок лучей, падающих по нормальям на контролируемую поверхность. Эта идея реализована в известных интерферометрах, например, КЮ-210 [1], ЮС-170 [1], ДВИН-600 [2]. Во всех случаях для создания сходящегося гомоцентрического пучка лучей используются фокусирующие объективы, исправленные на сферическую aberrацию. Увеличение диаметров контролируемых поверхностей влечет за собой увеличение диаметра и усложнение конструкции фокусирующего объектива, как это имеет место в интерферометре ДВИН-600. Его фокусирующий объектив (названный центральной линзовой системой) состоит из четырех линз диаметром 600 мм. Центральная линзовая система может использоваться только при горизонтальной ориентации ее оптической оси. Поэтому ДВИН-600 не применяется для контроля выпуклых сферических поверхностей деталей, расположенных на планшайбе станка.

При формообразовании оптических поверхностей большого диаметра их контролируют многократно. Для выпуклых сферических поверхностей диаметром до 700 мм в промышленности используют

метод переналожения пробного стекла [1]. Диаметр пробного стекла не может превышать 220 мм, поэтому в большинстве случаев пробное стекло существенно меньше диаметра контролируемой поверхности. В таких случаях поверхность проверяют по частям, что достаточно трудоемко. Кроме того, увеличивается погрешность контроля. Для облегчения контроля применяют интерферометр ЮС-170, который предназначен для выпуклых сферических поверхностей с радиусами кривизны свыше 425 мм и диаметрами до 700 мм. Конструкция данного интерферометра такова, что контролируемую деталь можно не снимать с планшайбы станка. Это позволяет после каждого цикла контроля корректировать форму измеряемой поверхности. Само пробное стекло установлено в специальную оправу, которая опирается на контролируемую поверхность и снабжена механизмом для его юстировки. В процессе контроля пробное стекло перемещают по контролируемой поверхности, причем каждый раз регулируют его положение с целью получения нужной ширины и направления полос на интерференционной картине. Эта операция может привести к повреждению контролируемой поверхности.

С целью обеспечения промышленности бесконтактным средством измерения формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра авторами данной статьи предлагается принципиально новая оптическая система интерферометра, схема которого с ходом лучей представлена на рис. 1.

Принцип работы интерферометра следующий. Монохроматический световой пучок, выходящий из He—Ne лазера 1 (длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм), расширяется коллимирующей системой 2. Внутри коллимирующей системы происходит фокусировка излучения: образуется светящаяся точка *A*, которая является точечным источником интерферометра. Далее излучение отражается от плоского зеркала 3, проходит через наклонные полупрозрачные пластины 4 и 5 и фокусируется объективом 6.

Объектив 6 создает гомоцентрический пучок с вершиной в точке *A'*. Этот пучок направляется к эталон-компенсатору 7. Центр *C*, кривизны поверхности Э эталон-компенсатора совмещен с точкой *A'*, поэтому лучи падают на поверхность Э по нормальям. Поверхность Э эталон-компенсатора является эталоном, а отраженные от нее лучи формируют эталонный волновой фронт. Прошедшие через поверхность Э лучи преломляются на второй (компенсирующей) поверхности эталон-компенсатора и направляются к сферическому зеркалу 8.

Крупногабаритное вогнутое сферическое зеркало 8 фокусирует световой пучок в центр кривизны контролируемой поверхности *K* детали 9, обеспечивая нормальное падение лучей на эту поверхность.

Сферический волновой фронт, образованный зеркалом 8 совместно с эталон-компенсатором 7 (эту систему будем называть фокусирующим объективом измерительной ветви интерферометра), представляет собой виртуальное пробное стекло, которое накладывается на

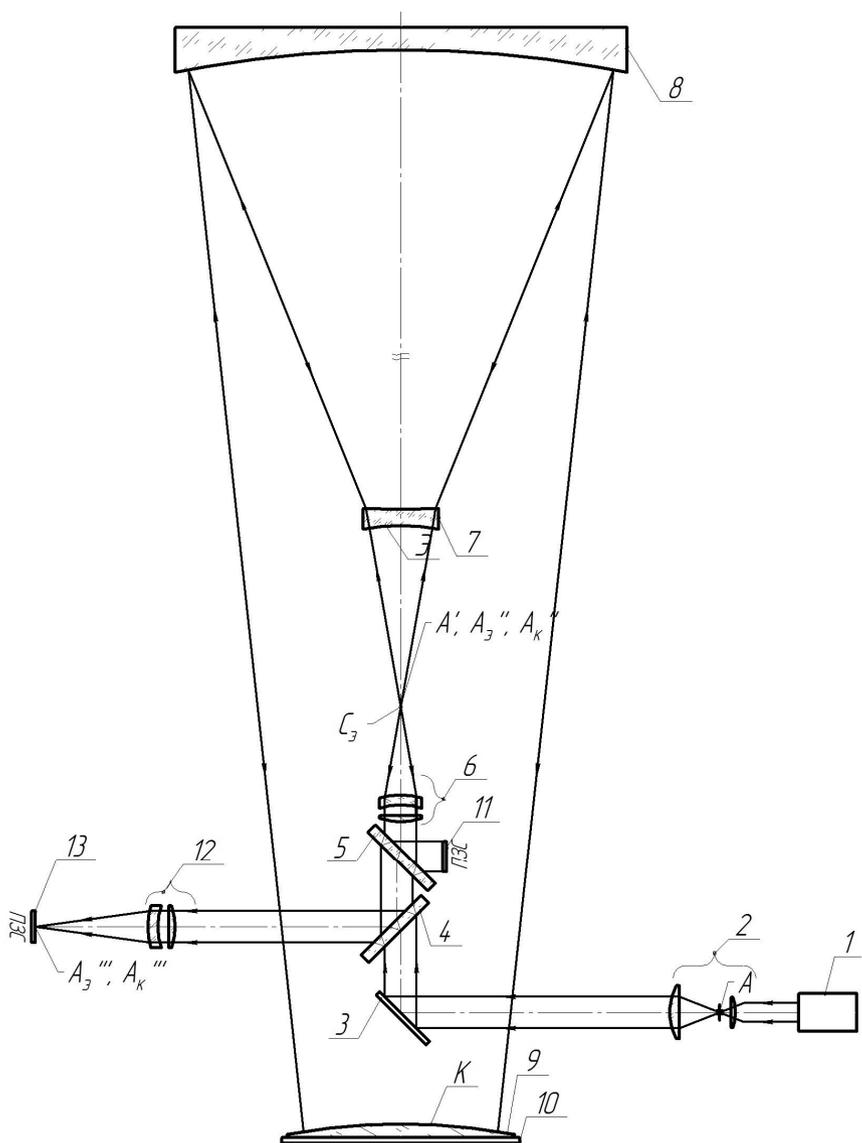


Рис. 1. Оптическая система интерферометра для измерения и контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра

контролируемую поверхность. Остаточные aberrации фокусирующего объектива измерительной ветви вносят в рабочий волновой фронт искажения, которые следует рассматривать как погрешности виртуального пробного стекла. В таком случае вид рабочей интерференционной картины будет определяться не только погрешностями формы контролируемой поверхности, но и этими остаточными aberrациями. Характер изгиба полос на рабочей интерференционной картине при остаточных aberrациях фокусирующего объектива измерительной ветви всегда аналогичен изгибу полос при зональной погрешности контролируемой поверхности. Чтобы виртуальное пробное стекло было идеальным, же-

лательна идеальная коррекция сферической аберрации объектива. В таком случае рабочий волновой фронт деформируется только погрешностями формы поверхности К.

После отражения от поверхности К рабочий волновой фронт распространяется в обратном направлении и интерферирует с эталонным волновым фронтом. Интерференционная картина проецируется на приемник излучения 11. Вид интерференционной картины определяется погрешностями поверхности К.

Для настройки интерферометра целесообразно использовать еще один приемник излучения 13, на который направляются пучки, сфокусированные на площадку приемника 13 объективом 12. Изображения точки А при отражении лучей от эталонной и контролируемой поверхностей формируются на поверхностях $A_{Э}''$ и $A_{К}''$.

Основное преимущество предлагаемого решения по сравнению с интерферометром ЮС-170 — бесконтактный контроль формы выпуклой сферической поверхности. При вертикальной ориентации оси сферического зеркала контролируемая деталь 9 может базироваться на планшайбе 10 станка.

Задача создания идеального фокусирующего объектива измерительной ветви осложняется тем, что центры кривизны контролируемых поверхностей располагаются на различных расстояниях от зеркала 8. Таким образом, возникает необходимость расчета объектива, состоящего из одного и того же вогнутого сферического зеркала и набора сменных эталон-компенсаторов с различными конструктивными параметрами. Очевидно, что поперечные размеры эталон-компенсаторов повлияют на диаметр неконтролируемой зоны на поверхности К, поэтому их следует минимизировать.

При разработке оптимальной конструкции идеального фокусирующего объектива измерительной ветви интерферометра был проведен анализ сочетаний радиусов кривизны и диаметров выпуклых сферических поверхностей, которые изготавливают в настоящее время. Точечная диаграмма (рис. 2) иллюстрирует, что значения радиусов кривизны большинства выпуклых сферических поверхностей, подлежащих контролю, составляют менее 3 000 мм, а значения их диаметров лежат в диапазоне 160...400 мм (значительно отличаются параметры только четырех поверхностей).

Важной характеристикой контролируемых поверхностей является их числовая апертура $\sin \sigma_{к.п}$, которую вычисляют по известной формуле

$$\sin \sigma_{к.п} = \frac{D_{к.п}}{2r_{к.п}},$$

где $D_{к.п}$ и $r_{к.п}$ — диаметр и радиус кривизны контролируемой поверхности.

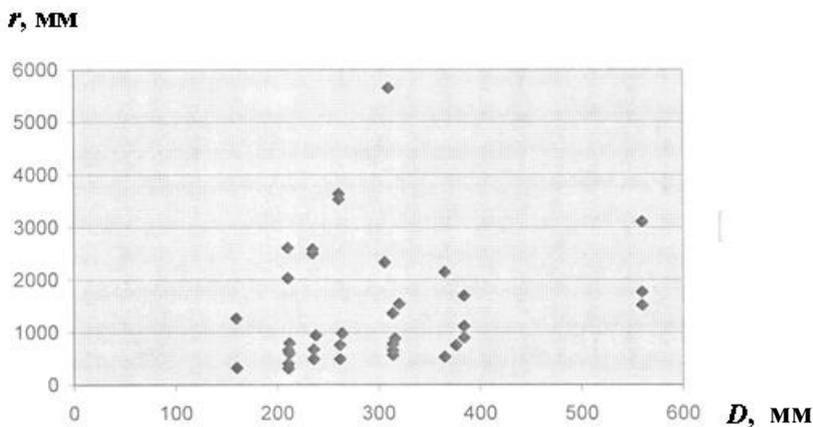


Рис. 2. Зависимость радиусов выпуклых сферических поверхностей от их диаметра

Именно числовые апертуры контролируемых поверхностей определяют необходимый диапазон числовых апертур гомоцентрических пучков, входящих в измерительную ветвь интерферометра. Числовые апертуры выпуклых сферических поверхностей, подлежащих контролю, лежат в диапазоне $0,025 \dots 0,35$. Совместный анализ параметров реальных выпуклых сферических поверхностей и их числовых апертур, а также опыт изготовления высокоточных вогнутых сферических зеркал позволили определить оптимальные параметры вогнутого сферического зеркала: диаметр $D_3 = 1\,200$ мм, радиус кривизны $r_3 = 2\,500$ мм.

струкция фокусирующего объектива имела недостатки: изготовление и аттестация крупногабаритного асферического зеркала вызывают трудности, а фокусирующий объектив не содержит в себе эталонной поверхности. Последнее обстоятельство затруднит юстировку интерферометра — установку компенсатора в номинальное положение. Кроме того, в оптическую систему такого интерферометра необходимо включать эталонную деталь.

В предлагаемом варианте фокусирующего объектива измерительной ветви интерферометра используется сферическое зеркало большого диаметра, причем его сферическая aberrация скомпенсирована одной сферической преломляющей поверхностью сменного эталон-компенсатора, а эталонная поверхность не только создает эталонный волновой фронт, но и участвует в юстировке интерферометра.

Исследования показали, что можно минимизировать количество эталон-компенсаторов, разбив совокупность параметров всех изготавливаемых контролируемых поверхностей на отдельные диапазоны. Для определения оптимальных границ каждого из диапазонов построена точечная диаграмма (рис. 3). Вертикальные линии на точечной диаграмме выделяют четыре диапазона, в пределах которых сгруппированы контролируемые поверхности с близкими значениями радиусов кривизны. Анализ данных, представленных на диаграмме, позволил сделать выбор оптимальных значений предметных расстояний, которые затем использованы при расчетах фокусирующего объектива измерительной ветви.

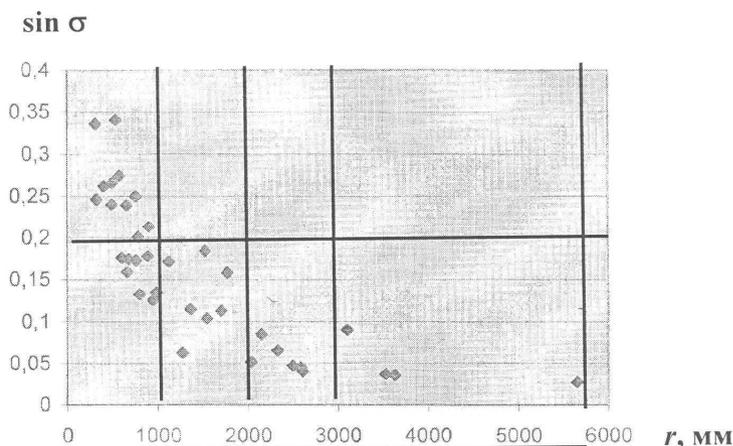


Рис. 3. Зависимость переднего апертурного угла эталон-компенсатора от радиуса кривизны контролируемой сферической поверхности

В таблице представлены результаты расчетов параметров и характеристик четырех вариантов измерительной ветви интерферометра, в которых фокусирующий объектив состоит из стационарного сферического зеркала диаметром $D_3 = 1\,200$ мм с радиусом кривизны $r_3 = 2\,500$ мм и сменного эталон-компенсатора. Расчеты показали, что

в каждом диапазоне параметров контролируемых деталей необходим свой эталон-компенсатор, который представляет собой двояковогнутую линзу из стекла К8. Эта линза установлена так, что центр кривизны ее первой по ходу лучей эталонной поверхности совмещен с задним фокусом объектива b (см. рис. 1). Для каждого из диапазонов контролируемых поверхностей толщина воздушного промежутка между компенсирующей поверхностью эталон-компенсатора и сферическим зеркалом вполне определена. Обобщенная схема фокусирующего объектива, на которой даны обозначения его основных элементов и параметров, показана на рис. 4. В таблице и на рис. 4 использованы одинаковые обозначения: КП — контролируемая поверхность; Э — эталонная поверхность; К — компенсирующая поверхность; З — поверхность сферического зеркала; $C_{к.п}$ — центр кривизны контролируемой поверхности; C_3 — центр кривизны эталонной поверхности интерферометра; s — удаление центра кривизны контролируемой поверхности от сферического зеркала; d_b — толщина воздушного промежутка между сферическим зеркалом и эталон-компенсатором; s' — удаление центра кривизны эталонной поверхности от самой поверхности; D_3 и $D_к$ — световые диаметры зеркала и эталон-компенсатора; σ и σ' — передний и задний апертурные углы крайних лучей, идущих в измерительной ветви, l_0 — остаточная волновая aberrация в измерительной ветви при автоколлимационном ходе лучей; $r_{к.п \max}$ — максимальный радиус кривизны выпуклой сферической поверхности, контролируемой в каждом из вариантов измерительной ветви; $\sin \sigma_{н.3}$ — числовая апертура неконтролируемой зоны.

Параметры контролируемых поверхностей для различных вариантов измерительных ветвей

Параметр контролируемой поверхности	Вариант измерительной ветви			
	–3 200	–4 000	–5 000	–7 500
s , мм	–1976,2	–1673,8	–1483,2,8	–1290,3
d_b , мм	–144,8	–371,7	–346,3	–400,4
s' , мм	–0,187	–0,135	–0,104	–0,053
$\sin \sigma$	–0,146	–0,152	–0,157	–0,136
$\sin \sigma'$	1 200	1 080	1040	800
D_3 , мм	43,7	85,5	112,5	111,2
$D_к$, мм	0,02	0,04	0,07	0,03
l_0 , λ	1 000	1 950	3 000	5 700
$\kappa_{к.п \max}$, мм	–0,02	–0,02	–0,02	–0,01
$\sin \sigma_{н.3}$	10,7	14,8	19,23	18,7
η , %				

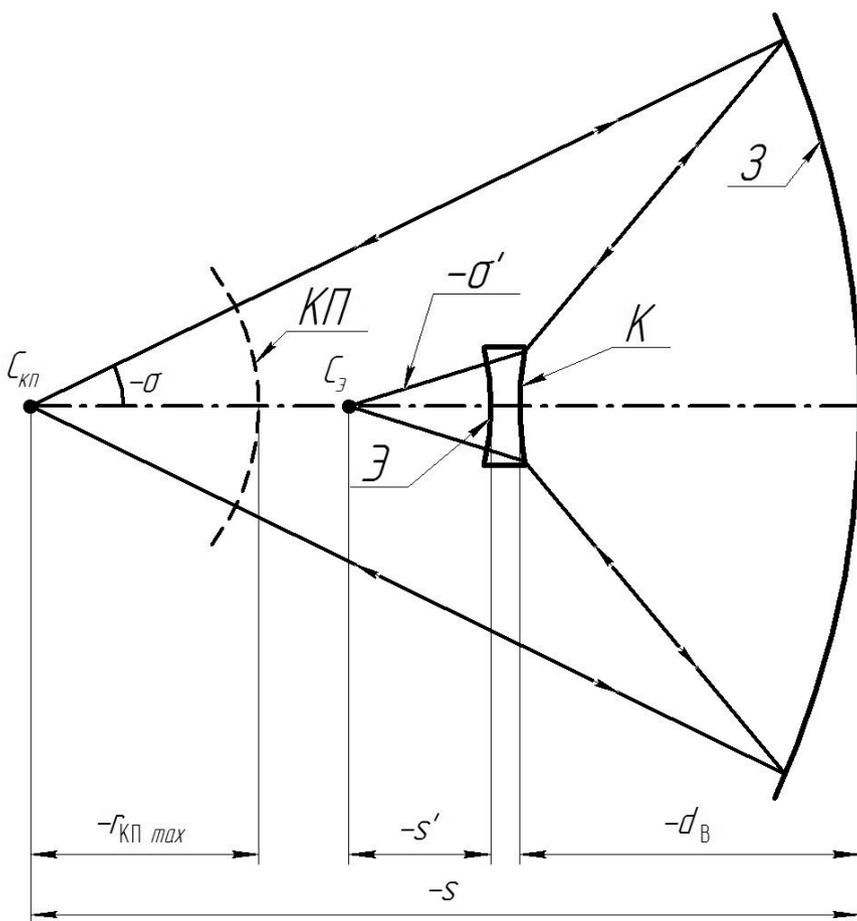


Рис. 4. Обобщенная схема фокусирующего объектива

Расчеты показали, что при использовании в измерительной ветви интерферометра четырех вариантов фокусирующего объектива за один прием можно проконтролировать форму 24 поверхностей, числовые апертуры которых не превышают значения 0,187. На диаграмме (см. рис. 3) точки, символизирующие эти поверхности, располагаются ниже горизонтальной линии. Поверхности, числовые апертуры которых больше 0,187, за один прием проконтролировать нельзя. В таких случаях можно использовать метод переналожений. Например, самая «апертурная» из известных выпуклых сферических поверхностей характеризуется $\sin \sigma_{к.п} = 0,34$ (точка, символизирующая эту поверхность на рис. 3, расположена в диапазоне 1). Для контроля профиля одного сечения этой поверхности на предлагаемом интерферометре потребуется четыре переналожения. Заметим, что для контроля одного сечения этой же поверхности на интерферометре ЮС-170 с пробным стеклом диаметром 220 мм также потребуется четыре переналожения пробного стекла. Преимущество предлагаемого интерферометра по сравнению с интерферометром ЮС-170 состоит в том, что в данном

случае контроль бесконтактный, поэтому даже при использовании метода переналожений опасность повреждения контролируемой поверхности исключена.

Из данных, приведенных в таблице, следует, что расчетные значения остаточных волновых aberrаций любого из вариантов фокусирующего объектива малы: при автоколлимационном ходе лучей они составляют от 0,02 до 0,07 λ (λ — длина волны используемого излучения). Поэтому данный интерферометр позволяет надежно выявлять погрешности формы выпуклых сферических поверхностей размером более 0,1 интерференционных полосы.

Очевидным недостатком предлагаемого интерферометра можно считать экранирование центральной зоны сферического зеркала, вследствие чего на любой контролируемой поверхности образуется неконтролируемая зона. Для оценки размеров неконтролируемых зон введем понятие «числовая апертура неконтролируемой зоны» — синус апертурного угла ($\sin \sigma_{н.з.}$) для луча, идущего из центра кривизны контролируемой поверхности в край оправы эталон-компенсатора. В таком случае коэффициент η экранирования вычисляется по формуле

$$\eta = \frac{\sin \sigma_{н.з.}}{\sin \sigma} \cdot 100 \%$$

Значения коэффициентов экранирования, полученные для каждого из диапазонов, представлены в таблице: они не превышают 20 %.

Расчеты диаметров неконтролируемых зон, выполненные для реальных выпуклых сферических поверхностей, показали, что они не превышают 100 мм. Так как неконтролируемые зоны расположены в центре поверхности, то информацию о погрешностях центральной части можно получить путем наложения обычного пробного стекла диаметром до 130 мм. Для измерения радиуса кривизны контролируемой поверхности, такая операция выполняется.

Следует отметить, что регистрация рабочей интерференционной картины и автоколлимационных точек, полученных при отражении лучей от контролируемой и эталонной поверхностей, осуществляется на координатные приемники излучения (матрицы ПЗС). Благодаря этому изображения могут быть переданы на экран монитора и в систему автоматизированной обработки измерительной информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-оптика / М.А. Окатов, Э.А. Антонов, А.В. Байгожин и др.; Под ред. М.А. Окатова. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
2. Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л., Иконина А.В. Оптические системы двухлучевых интерферометров. Ч. 2 / Под ред. Д.Т. Пуряева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 27 с.
3. Dudenkova K. A. New Objective for Laser Interferometer // Proc IONS-8. Moscow, 2010. P. 25—26.

Статья поступила в редакцию 16.10.2012