

Оптическая система интерферометра для контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра на базе вогнутого сферического зеркала и зеркала Манжена

© Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев, О.В. Рожков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Предложена 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 1 400 мм и шести сменных зеркал Манжена, диаметры которых лежат в диапазоне значений 20...150 мм. Волновая aberrация объектива при автоколлимационном ходе лучей не превышает 0,04 длины волны He-Ne-лазера. Эталонный волновой фронт образуется при отражении светового пучка от вогнутой сферической поверхности зеркала Манжена.

Ключевые слова: интерферометр, производственный контроль, форма поверхности, оптическая поверхность, сферическая поверхность, большой диаметр.

В работе [1] предложена оптическая система интерферометра, предназначенного для контроля формы выпуклых сферических поверхностей в процессе их производства. Отличительная особенность такого интерферометра состоит в том, что оптическая ось его измерительной ветви ориентирована вертикально. Это обеспечивает бесконтактный контроль формы крупногабаритных выпуклых сферических поверхностей оптических деталей без их снятия с планшайбы станка.

Эксплуатационным недостатком предложенного интерферометра является значительное экранирование центральной зоны контролируемой поверхности элементами осветительно-приемной части интерферометра. Однако эту зону можно проконтролировать либо стандартным пробным стеклом, либо с помощью контактного интерферометра ЮС-170 [2], в состав которого входят пробные стекла диаметром 220 мм.

Цель данной работы — разработка новой оптической системы интерферометра для бесконтактного контроля формы выпуклых сферических поверхностей в процессе их производства. Новый интерферометр позволяет значительно расширить диапазон типоразмеров контролируемых за один прием поверхностей по сравнению с диапа-

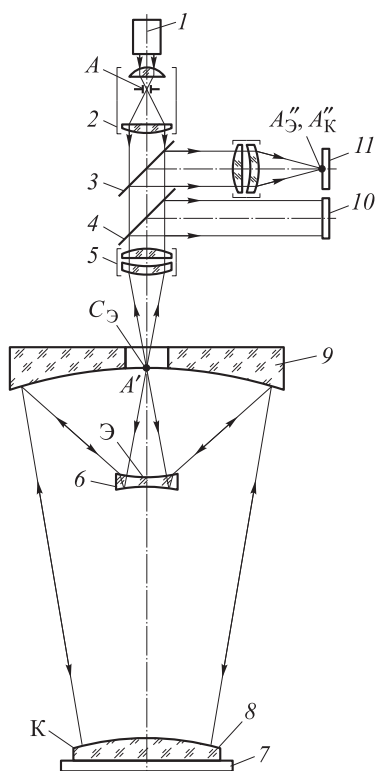


Рис. 1. Оптическая система интерферометра

зоном, охватываемым с помощью интерферометра, предложенного в работе [1]. В новом интерферометре значительно уменьшена неконтролируемая зона за счет выноса осветительно-регистрающей части интерферометра из хода лучей рабочего пучка.

Оптическая система нового интерферометра приведена на рис. 1. Монохроматический световой пучок, выходящий из He-Ne-лазера 1 (длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм), расширяется коллимирующей системой 2. Внутри этой системы образуется светящаяся точка A, которая является точечным источником интерферометра. Далее излучение проходит через наклонные полупрозрачные пластины 3 и 4 и фокусируется безаберрационным объективом 5 в точку A', которая является вершиной гомоцентрического пучка лучей. Гомоцентрический световой пучок направляется к зеркалу Манжена 6. Центр $C_{\text{Э}}$ кривизны первой по ходу лучей поверхности Э зеркала Манжена совмещен с точкой A', поэтому лучи падают на эту поверхность по нормальям. Отраженные от поверхности лучи формируют эталонный волновой фронт, прошедшие через поверхность лучи отражаются от второй поверхности зеркала Манжена и, преломившись в обратном ходе на поверхности Э, направляются к сферическому зеркалу 9.

Крупногабаритное вогнутое сферическое зеркало фокусирует световой пучок в центр кривизны контролируемой поверхности К детали 8, обеспечивая нормальное падение лучей на эту поверхность. Контролируемая деталь располагается на планшайбе 7 станка.

Оптическая система интерферометра (см. рис. 1) построена таким образом, что фокусирующий объектив измерительной ветви состоит из зеркала Манжена и сферического зеркала. Именно эти два элемента образуют квазиидеальный сферический волновой фронт, который представляет собой виртуальное пробное стекло, накладываемое на контролируемую поверхность. Остаточные аберрации фокусирующего объектива измерительной ветви вносят в рабочий волновой фронт искажения, которые следует рассматривать как погрешности виртуального пробного стекла. При этом вид рабочей интерференционной

картины будет определяться не только погрешностями формы контролируемой поверхности, но и этими остаточными аберрациями. Для того чтобы виртуальное пробное стекло было идеальным, необходима идеальная коррекция сферической аберрации фокусирующего объектива. В таком случае рабочий волновой фронт будет деформирован только погрешностями формы контролируемой поверхности.

После отражения от поверхности К рабочий волновой фронт распространяется в обратном направлении и интерферирует с эталонным волновым фронтом, сформированным поверхностью Э. Полученная интерференционная картина проецируется объективом на приемник излучения 10.

Для настройки интерферометра предложено использовать еще один приемник излучения 11, на чувствительную площадку которого фокусируются эталонный и рабочий пучки лучей. На рис. 1 A'_3 и A''_3 — изображения точки А при отражении лучей от эталонной и контролируемой поверхностей. Лучи эталонного и рабочего световых пучков направляются на чувствительные площадки приемников излучения 10 и 11 после отражения от наклонных полупрозрачных пластин. Рабочая интерференционная картина и автоколлимационные точки, полученные при отражении лучей от контролируемой и эталонной поверхностей, одновременно проецируются на координатные приемники излучения. Эти изображения могут быть переданы на экран монитора и в систему автоматизированной обработки измерительной информации.

При создании идеального фокусирующего объектива измерительной ветви рассматривалась возможность использования одного и того же вогнутого сферического зеркала совместно со сменными зеркалами Манжена. Число сменных зеркал Манжена определялось исходя из следующих условий:

- идеальная коррекция сферической аберрации (остаточная аберрация фокусирующего объектива измерительной ветви не должна превышать 0,02 длины волны используемого излучения);
- диаметр неконтролируемой зоны в центре поверхности детали не превышает 150 мм;
- охват типоразмеров выпуклых сферических поверхностей, контролируемых за один прием, максимальный.

Поиск оптимальной конструкции универсального фокусирующего объектива основывался на следующих принципах:

- 1) постоянным элементом объектива является вогнутое сферическое зеркало с отверстием, которое может сформировать сходящийся гомоцентрический пучок лучей с числовой апертурой до 0,35;
- 2) сменные зеркала Манжена представляют собой двояковогнутые линзы из бесцветного стекла наиболее употребительных марок,

на вторую по ходу лучей поверхность которых нанесено отражающее покрытие;

3) диаметры зеркал Манжена минимально возможные, поскольку зеркала экранируют центральную зону контролируемой поверхности.

На основании совместного анализа параметров реальных выпуклых сферических поверхностей и их числовых апертур, а также с учетом опыта изготовления высокоточных вогнутых сферических зеркал определили оптимальные параметры вогнутого сферического зеркала: диаметр зеркала: $D_3 = 1\,400$ мм, радиус его кривизны $r_3 = 2\,000$ мм; отношение $D_3 : r_3 = 0,7$. Известно, что на Лыткаринском заводе оптического стекла изготовлено высокоточное сферическое зеркало диаметром $1\,985$ мм с отношением $D_3 : r_3 = 0,73$. Это обстоятельство позволяет надеяться на возможность изготовления выбранного для интерферометра зеркала.

При разработке оптической системы данного интерферометра была поставлена цель значительно расширить диапазон типоразмеров контролируемых деталей путем увеличения числовой апертуры рабочего пучка. Последняя в интерферометре, описанном в работе [1], не превышала $0,187$, поэтому высокоапертурные поверхности предлагалось контролировать методом переналожений. Это в значительной степени определялось параметрами вогнутого сферического зеркала с отношением $D_3 : r_3 = 0,48$.

Очевидно, что выбранное сферическое зеркало потребовало принципиально новой конструкции компенсатора его сферической аберрации. Оптимальный вариант компенсатора в данном случае — это зеркало Манжена, которое содержит преломляющие и отражающие поверхности. При расчете множества компенсационных систем учитывается, что первая по ходу лучей поверхность зеркала Манжена должна выполнять функцию эталонной поверхности интерферометра. Компенсирующую функцию в таком случае выполняют две поверхности зеркала Манжена: отражающая и преломляющая. Оптимизация систем, состоящих из одного и того же сферического зеркала и сменных зеркал Манжена, обусловила использование шести вариантов конструкции зеркал Манжена.

На диаграмме (рис. 2) точками представлена совокупность всех выпуклых сферических поверхностей, подлежащих контролю в настоящее время. Кроме того, выделены шесть диапазонов (1–6), которые реально охвачены гомоцентрическими пучками, создаваемыми фокусирующими объективами с шестью сменными зеркалами Манжена. Точками, расположенными внутри каждого из диапазонов, обозначены выпуклые сферы, контролируемые за один прием. Видно, что из 36 реальных контролируемых выпуклых сфер нельзя проконтролировать за один прием только три сферы (соответствующие

им точки расположены на диаграмме выше горизонтальных линий). Для контроля этих трех сфер можно использовать метод переналожений, применяемый в интерферометре ЮС-170. Преимущество предлагаемого интерферометра по сравнению с интерферометром ЮС-170 заключается в том, что в данном случае контроль бесконтактный.

В таблице приведены параметры контролируемых поверхностей шести вариантов измерительной ветви интерферометра, в которых фокусирующий объектив состоит из стационарного сферического зеркала диаметром $D_3 = 1\,400$ мм с радиусом кривизны $r_3 = 2\,000$ мм и шести сменных зеркал Манжена. Каждый из фокусирующих объективов охватывает один из шести диапазонов типоразмеров контролируемых поверхностей.

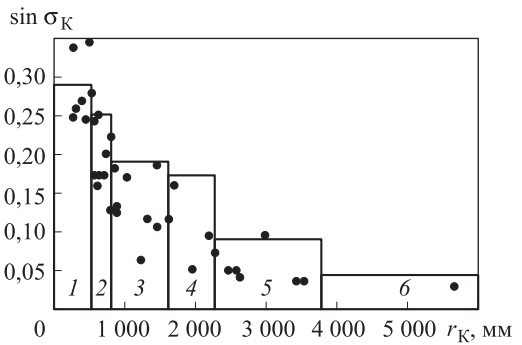


Рис. 2. Точечная диаграмма ($\sin \sigma_K$, r_K — числовая апертура и радиус кривизны контролируемой зоны)

Параметр	Номер варианта					
	1	2	3	4	5	6
s , мм	-2 300	-2 500	-3 000	-3 500	-5 000	-7 500
d_b , мм	-1 742	-1 606	-1 390	-1 215	-1 039	-960
s' , мм	53	160	273	968	851	1 082
$\sin \sigma$	-0,285	-0,242	-0,178	-0,162	-0,08	-0,027
$\sin \sigma'$	0,16	0,129	0,133	0,07	0,075	0,038
D_3 , мм	1 372	1 160	1 073	1 114	890	790
D_{M_2} , мм	21	44	80	146	134	81
l_0	0,04	0,04	0,036	0,034	0,036	0,034
$r_{K \max}$, мм	580	890	1 600	2 280	3 950	6 410
$\sin \sigma_{H3}$	-0,004	-0,025	-0,05	-0,075	-0,017	-0,006

На рис. 3 приведена обобщенная схема фокусирующего объектива измерительной ветви интерферометра. В таблице и на рис. 3 К — контролируемая поверхность; Э — эталонная поверхность; З — поверхность сферического зеркала; C_K — центр кривизны контролируемой поверхности; $C_Э$ — центр кривизны эталонной поверхности интерферометра; s — удаление центра кривизны контролируемой по-

верхности от сферического зеркала; d_B — толщина воздушного промежутка между сферическим зеркалом и зеркалом Манжана; s' — удаление центра кривизны эталонной поверхности от самой поверхности; D_3, D_M — световые диаметры сферического зеркала и зеркала Манжана; σ, σ' — передний и задний апертурные углы крайних лучей, идущих в измерительной ветви; l_0 — остаточная волновая aberrация в измерительной ветви при автоколлимационном ходе лучей; $r_{K \max}$ — максимальный радиус кривизны выпуклой сферической поверхности, контролируемой в каждом из диапазонов; $\sin \sigma_{H3}$ — числовая апертура неконтролируемой зоны (H3).

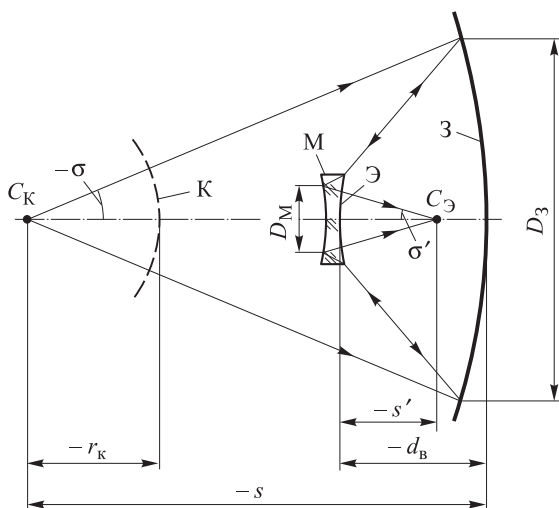


Рис. 3. Обобщенная схема фокусирующего объектива интерферометра

Расчетные значения остаточных волновых aberrаций любого из вариантов фокусирующего объектива малы. При автоколлимационном ходе лучей они не превышают $0,04\lambda$ (λ — длина волны используемого излучения). Поэтому данный интерферометр позволит надежно выявлять погрешности формы выпуклых сферических поверхностей высотой (или глубиной) более 0,1 интерференционной полосы.

Расчеты диаметров H3, выполненные для реальных выпуклых сферических поверхностей, показали, что они не превышают 130 мм. Поскольку неконтролируемые зоны расположены в центре поверхности, то информацию о погрешностях формы центральной части выпуклой поверхности можно получить путем наложения обычного пробного стекла. Такая операция выполняется в любом случае с целью измерения радиуса кривизны контролируемой поверхности.

Анализ предложенной оптической системы интерферометра на базе стационарного сферического зеркала и сменной линзы Манжана позволяет сделать следующие выводы.

1. Интерферометр обеспечивает бесконтактный контроль формы выпуклых сферических поверхностей оптических деталей, числовые апертуры которых не превышают 0,285. Радиусы кривизны контролируемых поверхностей могут достигать 6 000 мм.

2. Оптическая ось интерферометра ориентирована вертикально, что обеспечивает возможность контроля формы поверхностей оптических деталей без их снятия с планшайбы станка.

3. Широкий диапазон типоразмеров контролируемых поверхностей достигается за счет применения в измерительной ветви интерферометра фокусирующего объектива, состоящего из стационарного вогнутого сферического зеркала и шести сменных зеркал Манжена, содержащих эталонную поверхность.

4. Диаметры сменных зеркал Манжена не превышают 150 мм, материал — оптическое бесцветное стекло наиболее употребительных марок. Вогнутая эталонная поверхность каждого из зеркал Манжена не только формирует эталонный волновой фронт, но и используется для правильного позиционирования каждого зеркала относительно вершины гомоцентрического пучка лучей, сформированного безабберационным объективом осветительно-приемной части интерферометра. Особенность оптической системы интерферометра состоит в том, что объектив должен перемещаться вдоль оптической оси для совмещения его заднего фокуса с центром кривизны эталонной поверхности каждого из зеркал Манжена.

5. В центре контролируемой поверхности образуется неконтролируемая зона, диаметр которой определяется только зеркалом Манжена и его оправой. Элементы осветительно-приемной части интерферометра выведены за пределы рабочего пучка лучей, поэтому они не участвуют в создании НЗ.

6. Основным недостатком предлагаемой оптической системы интерферометра, по мнению авторов, является необходимость изготовления высокоточного вогнутого сферического зеркала диаметром 1 400 мм.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л., Дуденкова Е.А. Оптическая система интерферометра для измерения и контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 1. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/519.html> (дата обращения 28.10.2013).
- [2] Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. Окатов М.А., ред. Справочник технолога-оптика. Санкт-Петербург, Политехника, 2004, 679 с.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т., Рожков О.В. Оптическая система интерферометра для контроля формы выпуклых сферических поверхностей большого диаметра на базе вогнутого сферического зеркала и зеркала Манжена. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/917.html>

Лазарева Наталия Леонидовна родилась в 1944 г., окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 48 научных работ в области методов и приборов для высокоточного контроля формы оптических поверхностей. e-mail: av72399@mail.ru

Пуряев Даниил Трофимович родился в 1934 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1958 г. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный изобретатель РСФСР, лауреат Премии Совета министров СССР. За научные достижения в области оптического приборостроения награжден медалью им. академика С.Э. Фриша. Автор 285 научных работ в области оптического приборостроения.

Рожков Олег Владимирович родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный деятель науки и техники РФ, член оптического общества им. Д.С. Рождественского и Международного общества по оптотехнике (SPIE). Автор более 150 научных работ в области оптического приборостроения. e-mail: rozhkov@bmstu.ru