

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

УДК 681.7.023.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2011 г. В. А. Горшков, канд. техн. наук; А. В. Подобрый, канд. техн. наук

Научно-производственное объединение “Оптика”, Москва

E-mail: optikal@prooptica.ru

В научно-производственном объединении “Оптика” (НПО “Оптика”) разработан технологический автоматизированный комплекс для формообразования высокоточных оптических поверхностей (плоских, сферических, асферических, внеосевых).

Описывается состав комплекса, приведены технологические характеристики, результаты работ на комплексе, перспективы его дальнейшего развития.

Ключевые слова: высокоточная оптика, технологический комплекс, автоматизированное формообразование поверхности, компьютерная технология, станочное оборудование, метрологическое оборудование.

Коды OCIS: 220.4610

Поступила в редакцию 25.10.2010

От оптических систем наземного, воздушного и космического базирования, для исследований космического пространства, глобального мониторинга поверхности Земли и состояния ее атмосферы требуется высокое качество формирования изображения исследуемого объекта.

Диапазон габаритных размеров оптических компонентов указанных систем 300–10 000 мм, а требования к качеству формы поверхности по критерию среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{ско}} = \lambda/30 - \lambda/60$ ($\lambda = 0,6328$ мкм). Для получения требуемых выходных параметров оптической системы в настоящее время используют высокоапертурные оптические элементы сферической, плоской, асферической (осевые и внеосевые) форм, в том числе адаптивные с различной конфигурацией наружного периметра (многогранники) [1].

Для производства компонентов высокоразрешающих оптических систем была разработана компьютерная технология автоматизированного формообразования, которая охватывает задачи оптимизации технологических процессов производства такого вида оптических элементов, создания управляемого процесса формообразования оптических поверхностей на различных этапах обработки, в том числе миними-

зации технологических переходов и создания для этих целей нового класса оптического оборудования с компьютерным управлением всего технологического цикла.

Основной проблемой, которую предстояло разрешить при разработке компьютерной технологии производства высокоточной оптики, явилось создание управляемого процесса формообразования. Был создан парк компьютеризированных станков и фотоэлектрических интерференционных средств контроля, дающих возможность объективно оценивать состояние обрабатываемой поверхности на различных этапах шлифования, полирования и доводки и, тем самым, минимизировать время обработки при достижении требуемой точности [2].

Сущность компьютерной технологии производства высокоточной оптики

Схема компьютерной технологии производства высокоточной оптики проиллюстрирована на рис. 1. Основой являются созданная технологическая система автоматизированного формообразования (ТЕСАФ) и парк технологического, метрологического и станочного оборудования.



Рис. 1. Технологическая система автоматизированного формообразования (ТЕСАΦ).

Программный пакет ТЕСАΦ решает практически все технологические переходы производства высокоточной оптики, в том числе внеосевой (табл. 1) [3].

Конструктивные особенности, условия крепления и работы в штатных ситуациях изготавливаемого оптического элемента анализируются программным блоком ASTRO. Он определяет основные характеристики поверхности оптического элемента – среднее квадратическое отклонение формы поверхности и размах ошибки (P-V). Этот же программный блок определяет эффективность штатной системы разгрузки и базирования оптического элемента, при необходимости выдает рекомендации по изменению его конструктивных параметров. Он также вычисляет и оптимизирует параметры технологических систем стабилизации формы поверхности оптического элемента на всех технологических циклах его изготовления, включая операции кантования, подъема, внутрицеховой транспортировки.

Программным блоком АДАПТАЦИЯ выдаются параметры для систем управления привода-

ми адаптивных зеркал, определяются функции отклика от воздействия единичных факторов, таких как рассогласование опор, влияние массы полировальника, нагружение по периметру.

На основании данных программ ASTRO и АДАПТАЦИЯ выбираются вид системы разгрузки и стабилизации формы поверхности оптического элемента, количество точек разгрузки, их расположение. Определяется также система контроля формы поверхности: вертикальная, горизонтальная, комплексная.

При разработке компьютерной технологии одними из наиболее важных являются решения вопросов визуализации информации о состоянии формы поверхности и цифровая обработка изображения для получения объективных оценок. Для их решения наиболее эффективны методы интерферометрии, выходной информацией которых являются интерферограммы поверхностей обрабатываемых деталей и их топографические карты. Для обработки интерферограмм применяются программные блоки ADK, SDWIG, INT-to-Top.

Таблица 1. Области применения разработанных технологических программ

Технологические проблемы	Программы	Решаемые задачи
оптимизация конструкции сложных систем	ASTRO-PLANK MIRROR	расчет деформаций оптических элементов от собственной массы, внешних нагрузок и термических воздействий расчет облегчения конструкций оптических элементов, расчет штатных систем разгрузки выбор эффективных точек приложения усилий при адаптации
разработка вспомогательной технологической оснастки	ASTRO-PLANK MIRROR	расчет конструкций технологических оправ, имитирующих невесомость изделия при обработке и контроле расчет конструкций технологических оправ обеспечивающих минимальные деформации изделий при изготовлении и контроле
расчет параметров заготовки	ADK	расчет конфигурации заготовки для изделий с асферическими поверхностями, в том числе внеосевых, с минимальным припуском
обработка результатов измерений формы поверхности контактными методами	ADK, RADIUS	преобразование данных сферометра, линейного сферометра и измерительных машин в топографическую карту (профиль) отклонений поверхности от требуемой сферы или асферики, в том числе внеосевой
обработка данных прямого интерференционного контроля обрабатываемой поверхности	ADK, INT-to-Top	преобразование интерференционной картины в топографическую карту поверхности обрабатываемой детали
обработка данных косвенного интерференционного контроля	SDWIG	реконструкция топографической карты поверхности по интерферограммам бокового сдвига
визуализация топографических карт поверхности	ADK, TopDemo2	наглядное и разнообразное представление топографий обрабатываемой детали
расчет припуска для обработки	AD3, MSO	расчет припусков от поверхности сравнения, от требуемой асферической поверхности, в том числе внеосевой
выбор инструмента для обработки	ADK	рекомендует набор инструментов для выбранной детали из базы данных инструментов, в том числе ионных
поиск траектории инструмента при обработке	ADK, MODEFOR	расчет траектории движения инструмента и ее оптимизация
изготовление маски	MASKA	расчет конфигурации маски для доводки формы или асферизации оптической детали ионным пучком
аттестация полученных поверхностей	ADK, TopDemo2, MSO	оценка параметров топографий полученных поверхностей с выделением составляющих полиномов и мелкоструктурной ошибки
адаптация	ADA	расчет управляющих воздействий для коррекции формы поверхности оптической детали, в том числе в масштабе реального времени
тестирование технологических программ	TopMODEL	формирование контрольных исходных данных для проверки прикладных технологических программ

Одним из основных программных блоков технологического комплекса ТЕСАФ является блок АНК, анализирующий параметры обрабатываемой поверхности, технологические коэффициенты, виды обработки, эффективность технологического процесса. Он формирует управляющую программу обработки поверхности и прогнозирует ее характер в режиме реального времени с выдачей основных параметров на основе математической модели, которая реализуется в дальнейшем сеансе обработки.

Данные управляющей программы адресуются в автоматизированные системы формообразования – станки серии АПД (автоматизиро-

ванные полировально-доводочные), осуществляющие абразивное воздействие на обрабатываемую поверхность – шлифование и полирование.

Компьютеризированный технологический процесс предусматривает один или несколько замкнутых циклов обработки, в каждом из которых присутствует обратная связь по технологическим параметрам (давлению, скоростям, технологическому коэффициенту, времени и температуре), определенным анализом параметров реально полученной и прогнозируемой поверхностей. Это позволяет минимизировать функции рассогласования реального процесса и его математической модели (рис. 2).

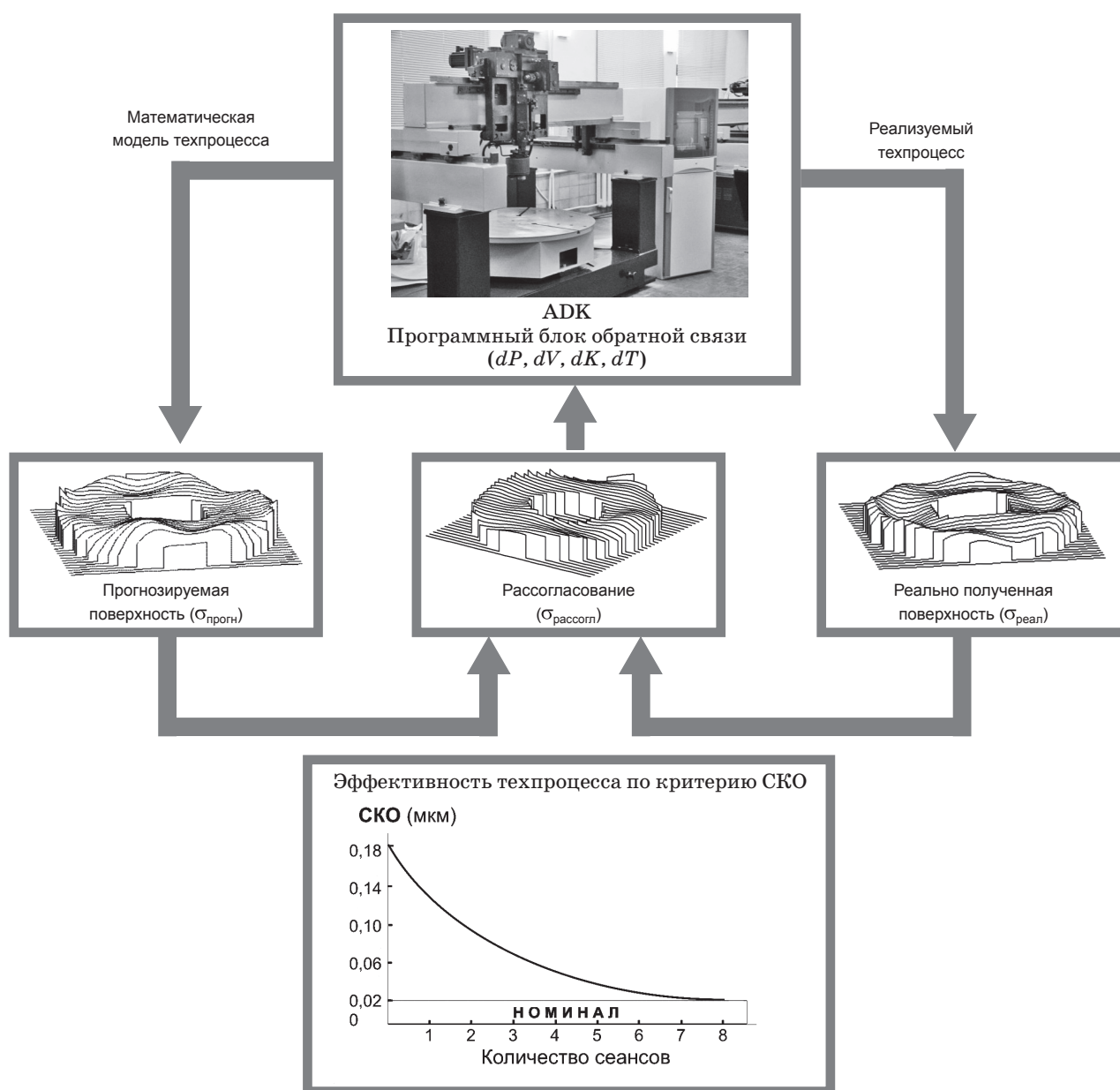


Рис. 2. Циклы минимизации функции рассогласования реального процесса обработки и его математической модели.

Формообразование поверхности заканчивается при достижении заданных параметров рабочей поверхности σ , $P-V$, номинальных характеристик $\sigma_{\text{ном}}$, $(P-V)_{\text{ном}}$.

Автоматизированные доводочные станки для реализации компьютерных технологий

Станки серии АПД осуществляют доводку формы любых монотонных оптических деталей как пологих (малоапертурных) на станках АПД-1000, АПД-2000, АПД-4000 (с крутизной не более 20°), так и крутых (высокоапертурных) – на станках АПД-250, АПД-500, АПД-600 (с крутизной не более 45°). Автоматизированное формообразование осуществляется инструментами, совершающими плоско-параллельное круговое движение, перемещаемыми по обрабатываемой поверхности в соответствии с программой, задающей скорость этого перемещения и его траекторию в прямоугольной или полярной системе координат. За работу станков отвечают управляющие вычислительные комплексы, которые не только осуществляют расчет программы обработки, но и управляют приводами станков.

Конструктивно станки АПД-1000, АПД-1000В, АПД-2000 и АПД-4000 однотипны, построены по блочной схеме и выполнены в виде портала, перемещаемого по двум балкам станины над рабочей поверхностью стола. Пер-

пендикулярно движению портала передвигается каретка, несущая пиноль со шпинделем. Пиноль обеспечивает вертикальное движение шпинделя с закрепленной на нем насадкой, предназначенной для сообщения осциллирующего движения полировальнику и нагружения его в процессе обработки. Кроме того, на станках АПД-1000В установлены поворотные столы. В отличие от перечисленных, станки АПД-250 и АПД-600 оснащены наклонно-поворотными столами.

Принятые компоновки станков АПД-1000, АПД-2000, АПД-4000 позволяют вести обработку детали в прямоугольной 3-х координатной системе, в станках же АПД-250 и АПД-600 помимо прямоугольной можно использовать и полярную систему. Кроме того, наклонно-поворотные столы станков АПД-250 и АПД-600 обеспечивают возможность обработки деталей с большой крутизной рабочей поверхности. Все станки оснащены автоматической системой управления на базе промышленного компьютера модели AWS-825.

Конструктивная схема станков АПД-1000 и АПД-2000 разработана с условием обеспечения их максимальной унификации. Станки выполнены по блочно-модульной структурной схеме, достаточно не сложны в изготовлении и отличаются, главным образом, качественными характеристиками. Технические характеристики станков приведены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики станков

Характеристика	Модели станков					
	АД-250	АПД-500	АПД-600	АПД-1000, АПД-1000В	АПД-2000	АПД-4000
наружный диаметр обрабатываемой детали не более, мм	250	500	600	1000	2000	4000
частота вращения шпинделя, об/мин	4–1000	5–250	5–250	5–250	4–200	4–200
Наибольший ход по координатам						
X, мм	330	750	750	1000	2000	4000
Y, мм	250	800	800	1100	2100	5000
Z, мм	140	130	300	135	135	300
B, град	90	45	45	—	—	—
C, град	360	360	360	—	—	—
амплитуда осцилляции, мм	17,5	35	35	35	35	75
сила прижима инструмента, Н	0,2–24,4	4–250	4–250	4–370	4–370	98–2450
устройство ЧПУ, тип	AWS-825					
Габариты станка без шкафов управления, мм						
длина	950	2100	2100	2800	4000	7750
ширина	930	1900	1900	2200	3400	7500
высота	1750	2300	2200	2100	2100	4300
площадь, занимаемая станком, м ²	3,2	8,0	8,0	12	22	54
масса, кг	600	2000	1900	2500	4000	15 000

Примечание. B – наклон стола, C – вращение стола, ЧПУ – числовое программное управление.

Парк интерференционных средств контроля

Важнейшим элементом разработанного технологического комплекса автоматизированного формообразования являются средства объективного контроля состояния формы обрабатываемой поверхности на всех технологических стадиях ее обработки, позволяющие исключить влияние человеческого фактора на качество изготовления оптической детали. Посредством их возможно получение функций откликов контролируемой поверхности при любых воздействиях на оптическую деталь, таких как технологическая обработка поверхности, условия базирования, способы транспортировки и воздействие элементов системы адаптации. На основании получаемой информации определяется эффективность проводимой технологической операции и формируются команды-сигналы обратной связи для коррекции технологического процесса или команды на его завершение.

Основными требованиями, предъявляемыми к средствам контроля состояния формы поверхности, являются получение и визуализация информации по всей площади контролируемой поверхности, возможность фиксации получен-

ной видеоинформации, автоматизированная обработка информации для получения топографической карты поверхности и возможность обработки информации в режиме реального времени. Область применения и особенности разработанных интерферометров приведены на рис. 3, а их основные технические характеристики – в табл. 3.

Особенности интерферометров

Интерферометр ИКИ (инфракрасный интерферометр). Интерферометр имеет два встроенных источника излучения: He-Ne-лазер ($\lambda = 0,6328$ мкм) для юстировки оптической системы и CO₂-лазер ($\lambda = 10,6$ мкм). Особенно эффективно применение данного прибора при асферизации оптических поверхностей шлифованием до значений асферичности 50 мкм. Погрешность измерения – не более $\lambda/20$ (0,5 мкм).

Интерферометр ИНТЕРС (интерферометр сдвига). Основным достоинством данного прибора является его высокая защищенность от вибраций за счет изменения бокового сдвига волновых фронтов. Интерференционная картина регистрируется телевизионной камерой на матрице ПЗС с выходом на монитор и на пер-



Рис. 3. Обеспечение интерферометрическими средствами контроля технологических стадий формообразования.

Таблица 3. Технические характеристики разработанных интерферометров

Тип интерферометра	ИКИ	ИНТЕРС	ПИКА	ИФК
диапазон относительных отверстий рабочей ветви	1:2,5	1:3	от 1:11 до 1:1,15	от 1:11 до 1:2
длина волны излучения источника, мкм	10,6	0,6328	0,6328	0,6328
режим работы	с опорным волновым фронтом	боковой сдвиг волновых фронтов	с опорным волновым фронтом, в том числе с корректорами волнового фронта	радиальный сдвиг, в том числе с корректорами волнового фронта
метод регистрации интерференционной картины	амплитудный	амплитудный	амплитудный	фазовый
погрешность контроля ((P-V)/σ), мкм	0,5/0,09	от 15/2,5 до 0,06/0,01	0,03/0,005	0,015/0,0025

сональный компьютер через систему технического зрения. Основная область использования прибора – контроль формы асферических поверхностей вплоть до значений асферичности 300 мкм с погрешностью не более 5% от измеряемой величины.

Интерферометр ПИКА (прибор интерференционного контроля асферики) работает в неравноплечем режиме с опорным волновым фронтом по схеме Тваймана–Грина. В рабочей ветви прибора могут быть размещены сменные объективы с относительными отверстиями от 1:11 до 1:1,15 в зависимости от параметров контролируемых поверхностей, а также корректоры волновых фронтов при контроле асферических поверхностей.

Регистрация интерференционной картины осуществляется специальной телевизионной камерой на матрице ПЗС с регулируемым временем экспозиции, которая имеет выход через электронный процессор на монитор и персональный компьютер. Процессор обеспечивает определение координат экстремумов интерференционных полос, а программное обеспечение – построение топографической карты контролируемой поверхности с погрешностью не хуже $\lambda/20$ (около 0,03 мкм).

Интерферометр ИФК-1 (интерферометрический фазовый комплекс). Прибор работает в режиме радиального сдвига волновых фронтов. В одной из ветвей интерферометра осуществляется гармоническая модуляция фазы волнового фронта, а регистрация интерференционной картины обеспечивается фотодиодной матри-

цей, информация с которой в виде изображения интерферограммы выводится через электронный процессор на монитор и в виде массива значений дробных порядков интерференции в точках с известными координатами – в персональный компьютер.

Использование режима радиального сдвига волновых фронтов (его достоинство – высокая помехозащищенность от вибраций) в совокупности с фазовым методом регистрации интерферограмм (высокая помехозащищенность от оптических шумов) обеспечивают данному прибору погрешность не более $\lambda/100$, что особенно важно для аттестационного контроля.

Заключение

Разработанные компьютеризированная технология и система автоматизированного формообразования высокоточной оптики позволили повысить точность обработки плоских, сферических и асферических, в том числе внеосевых поверхностей оптических деталей, до дифракционного предела разрешения оптической системы. Эта технология позволяет выполнять обработку поверхностей оптических деталей с облегченной структурой, поверхностей тонких и сверхтонких зеркал, зеркал с некруглой конфигурацией внешнего периметра, что было невозможно при ранее существовавшей технологии, основанной на интуиции высококвалифицированного рабочего-оптика и ручной ретуши.

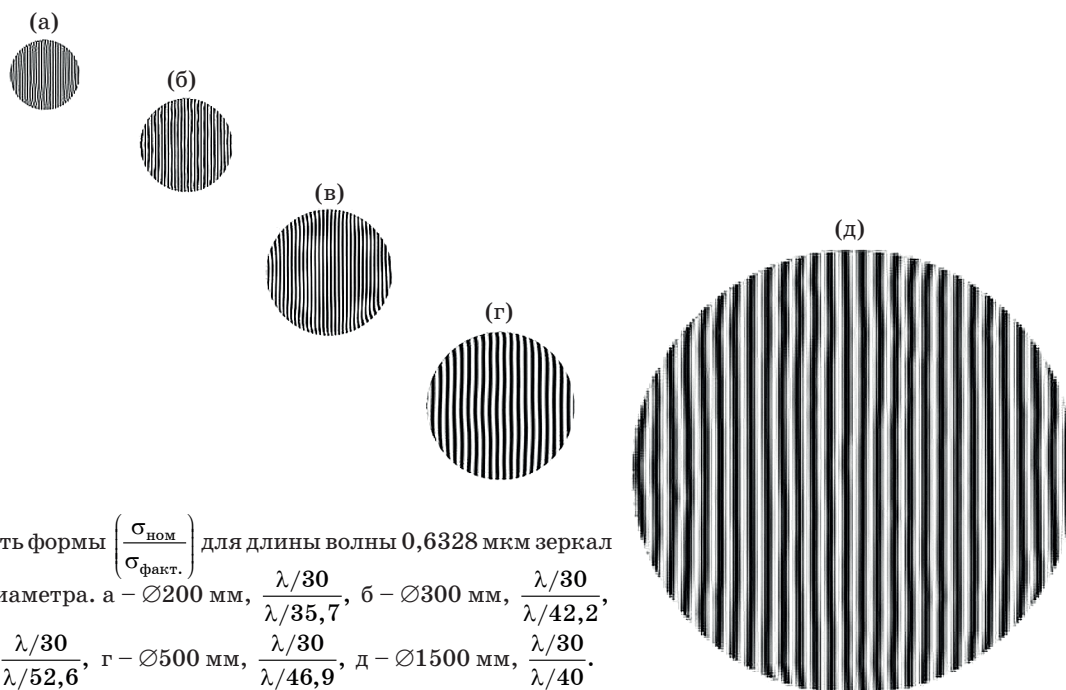


Рис. 4. Точность формы $\left(\frac{\sigma_{\text{ном}}}{\sigma_{\text{факт.}}}\right)$ для длины волны 0,6328 мкм зеркал различного диаметра. а – Ø200 мм, $\frac{\lambda/30}{\lambda/35,7}$, б – Ø300 мм, $\frac{\lambda/30}{\lambda/42,2}$, в – Ø400 мм, $\frac{\lambda/30}{\lambda/52,6}$, г – Ø500 мм, $\frac{\lambda/30}{\lambda/46,9}$, д – Ø1500 мм, $\frac{\lambda/30}{\lambda/40}$.

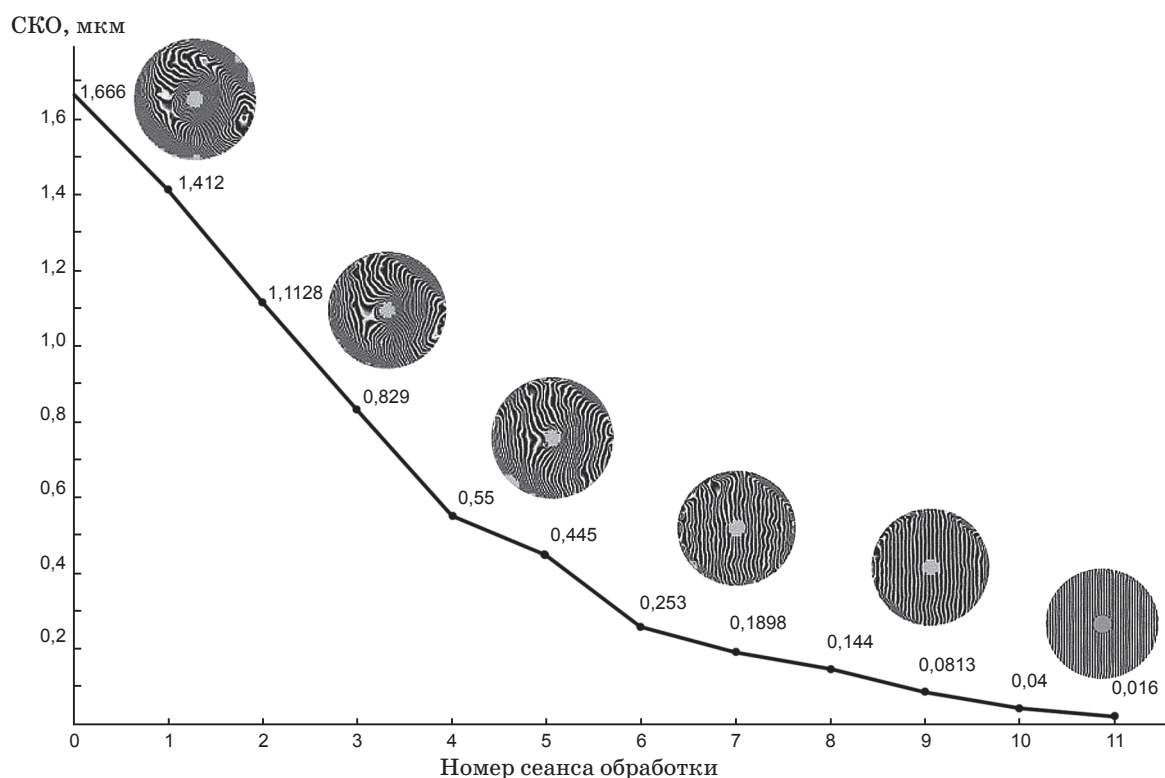


Рис. 5. Динамика процесса формообразования параболического зеркала диаметром 1000 мм.

В период с 2004 по 2010 гг. с применением разработанной технологии было изготовлено порядка 160 зеркал различных типоразмеров диаметром от 50 мм до 1600 мм, преимущественно асферических и внеосевых [4].

На рис. 4 в качестве примера показаны результаты обработки зеркал различного диаметра с фактически достигнутыми параметрами, а на рис. 5 приведен пример динамики процесса формообразования параболического зеркала диаметром 1 м.

Возможности разработанной технологии автоматизированного формообразования позволяют производить высокоточные оптические элементы для оптико-электронных систем самого различного назначения, повысить качество и конкурентоспособность выпускаемых в России оптико-электронных изделий на мировом рынке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. Справочник технолога-оптика. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.

2. Савельев А.С., Горшков В.А. Способ формообразования поверхностей крупногабаритных оптических деталей малым инструментом // Патент России № 2111106. 1998.
3. 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. Т. 70. № 5. С. 25.
4. Горшков А.В., Корнеев Н.Г., Лямин Ю.Б., Папаев А.Ю., Подобранный А.В. Изготовление осесимметричных асферических оптических поверхностей на станке АФ-90 // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 10. С. 48.



Подобранный Анатолий Викторович окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана в 1965 г., кандидат технических наук (1968), старший научный сотрудник (1984), доцент (1989), заслуженный машиностроитель РСФСР, лауреат премии Государственного комитета оборонной промышленности России, лауреат премии Правительства РФ за разработку технологии производства крупногабаритной оптики (2010), председатель правления московского регионального отделения оптического общества им. Д.С. Рождественского, генеральный директор Федерального государственного унитарного предприятия “Научно-производственное объединение “Оптика”.

Область научных интересов: научные исследования в области создания автоматизированных систем управления сборочными процессами оптико-электронных систем гражданского и двойного назначения, а также систем управления формообразования оптических поверхностей.

Автор и соавтор более 100 печатных научных работ (в том числе учебников) и изобретений.



Горшков Владимир Алексеевич окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана в 1969 г., кандидат технических наук (1980), лауреат премии Совета Министров СССР (1982), лауреат премии Правительства РФ (2010), заслуженный технолог Российской Федерации (1993), член редколлегии “Оптического журнала”, награжден медалью С.А. Зверева (2004), заместитель генерального директора, начальник отделения Федерального государственного унитарного предприятия “Научно-производственное объединение “Оптика”.

Область научных интересов: интерферометрический контроль формы оптических поверхностей, создание метрологических средств контроля качества оптических поверхностей в различных областях спектра, научные исследования механических и трибологических свойств наноструктурированных поверхностей оптических деталей и покрытий.

Автор и соавтор более 40 печатных научных работ и 30 изобретений.