

# ПРОБЛЕМЫ ОПТИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 533.317.2:536.455

## ТЕХНОЛОГИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2009 г. В. В. Михайлов; А. В. Парака; В. Н. Чекаль; Ю. И. Чудаков; А. Я. Чухнин; С. Е. Шевцов, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: shevtsov@niiki.ru

В статье представлена работа, проведенная в НИИКИ ОЭП для создания технологии автоматизированного формообразования прецизионных оптических поверхностей, включающей оборудование для шлифования и полирования оптических поверхностей, средства интерференционного контроля, программное обеспечение и методики использования малоразмерного инструмента. Представлены результаты обработки поверхности лазерного зеркала с асферичностью 400 мкм.

*Ключевые слова:* управляемое формообразование, шлифование, полирование, интерференционный контроль.

Коды OCIS: 220.0220; 220.4610

Поступила в редакцию 11.03.2009

### Введение

Разработка и применение технологии автоматизированного формообразования прецизионных оптических поверхностей малоразмерным инструментом к настоящему времени стали одними из традиционных направлений в деятельности опытного производства НИИКИ ОЭП. После определения к концу 80-х гг. в общих чертах основных элементов технологии – оборудования, методики и программного обеспечения, главные усилия были приложены к ее использованию в реальном процессе производства коммерческой продукции. Практика показала необходимость постоянного совершенствования всех трех компонентов технологии с целью увеличения эффективности процесса производства и адаптации к расширяющейся номенклатуре выпускаемой продукции.

### Оборудование

Для обеспечения процесса управляемого формообразования необходимо наличие координатно-доводочных станков с числовым про-

граммным управлением и средств контроля формы поверхности. Первые макетные варианты автоматизированных доводочных комплексов в НИИКИ были реализованы на основе координатно-шлифовального станка 3289АФ1 отечественного производства и координатно-шлифовального станка 6GA производства фирмы *Mitsui Seiki*, Япония. На этих комплексах были отработаны основные элементы технологии. В 80-х годах Сморгонский завод начал выпуск станков серии “АД”, разработанных в НПО “Оптика”; станки модификаций АД-1000 и АД-2000 с числовым программным управлением (ЧПУ) “Луч-43М” были приобретены нашим институтом. Опыт эксплуатации станков АД показал необходимость их доработки, в первую очередь, в части устройства ЧПУ. На первом этапе пришлось проектировать и изготавливать связь между ЭВМ, предназначенной для генерации ЧПУ-программ, и устройством ЧПУ, поскольку объем информации доводочных программ превышал допустимый для переноса на перфолентах. В дальнейшем выяснилась также ненадежность блока интерпретации кадров ЧПУ, приводившая

к частым сбоям при выполнении программ. Кроме того, алгоритм построения и отслеживания траектории, реализованный штатным ЧПУ, имел особенности, приводившие к отклонениям средней скорости подачи шпиндельной головки в зависимости от угла между участком траектории и координатными осями станка и скоростей на соседних участках. Далее, управляющий язык ЧПУ предусматривал задание скорости подачи всего двумя значащими цифрами, что достаточно грубо для одного из основных формообразующих параметров. Это приводило к возникновению заметной систематической ошибки обработки, зависящей от вида траектории, припуска на обработку и расположения обрабатываемой детали на станке. Поэтому следующим шагом стала замена блока интерпретации ЧПУ-программы и блока интерполятора, путем перенесения этих функций из штатного ЧПУ в дополнительный персональный компьютер, взаимодействующий напрямую с электронными блоками управления приводами и исполнительными механизмами станка.

Такая конфигурация числового программно-управления станком, внедренная в середине 90-х гг. показала свою надежность, практически исключив аппаратные сбои по вине ЧПУ и повысив предсказуемость результатов обработки. Например, остаточная ошибка после асферизации полированием (без коррекции формы по результатам контроля) внеосевых параболюидов диаметром до 500 мм и асферичностью до 50 мкм во многих случаях лежит в пределах 5–10% от начального припуска. Однако, в связи с моральным устареванием ЧПУ “Луч-43М” и отсутствием запасных частей к нему было принято решение разработать и внедрить модернизированную систему числового программного управления на основе промышленного или персонального компьютера и промышленных плат сбора информации и управления. Такое ЧПУ было создано совместно с предприятием “ПиК” при участии сотрудников СПбГЭТУ и получило название SCAN-12. В данном ЧПУ используются платы сбора данных и управления фирмы *Advantech* PCL-833, PCL-726 и PCL-730, в качестве базовой операционной системы используется ОС QNX фирмы *QNX Software Systems*. Устройство реализует трехкоординатное траекторное управление станком (с возможностью расширения до 5 координат), а также управление скоростью вращения главного привода, обеспечивая функционирование станка как в ручном, так и в программном режимах. В программном режиме

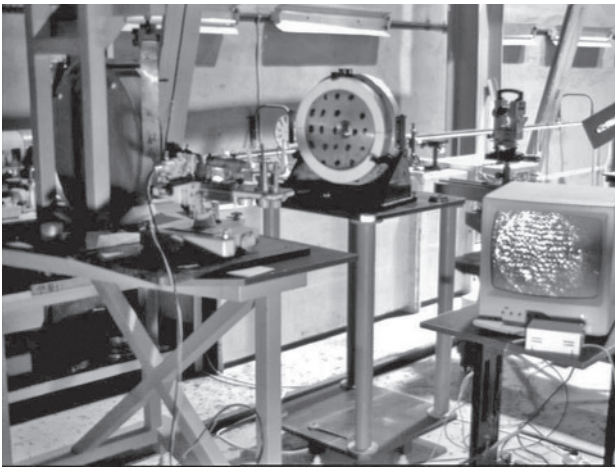
ЧПУ интерпретирует и исполняет в реальном времени управляющую программу в формате ISO-7 bit. ЧПУ подключается к локальной сети Ethernet, что обеспечивает возможность создания интегрированной системы формообразования, объединяющей станки, средства контроля и автоматизированные рабочие места на основе персональных компьютеров. К особенностям ЧПУ SCAN-12 можно отнести работу с удаленными (сетевыми) проектами деталей и удаленную загрузку программ, наличие функций для облегчения привязки системы координат детали к системе координат станка, отслеживания пройденного участка траектории и возврат на траекторию из произвольной точки в случаях остановок, включения-выключения и сбоев оборудования.

Другие доработки оборудования станков АД были связаны с повышением производительности формообразования посредством изменения конструкции инструментальной головки и главного привода станка.

Особое значение для достижения высокой точности обрабатываемой поверхности имеют средства контроля. В основу используемых на предприятии контрольных схем положены интерферометры Тваймана–Грина и Физо.

Большое внимание было уделено унификации используемой для контроля и обработки оснастки, созданию универсальных элементов схем контроля, что позволило оперативно производить настройку схем под меняющиеся размеры и параметры контролируемых оптических элементов. Так как большинство заказываемых асферических оптических элементов относилось к классу внеосевых вогнутых параболических зеркал, для их контроля было создано несколько стендов. Эти стенды позволяют с минимальной перенастройкой, занимающей, как правило, от нескольких минут до часа рабочего времени, контролировать внеосевые параболюиды диаметром от 50 до 600 мм, с относительным отверстием до 1:1,5, фокусным расстоянием от десятков сантиметров до нескольких метров и с различными внеосевыми смещениями (рис. 1). Для контроля параболюидов с относительным отверстием до 1,3:1 и диаметром до 200 мм создан стенд на основе высокоапертурного интерферометра КЮ-757М [1].

Поскольку одним из важных применений метода управляемого формообразования на предприятии стала доводка крупногабаритных дисковых активных элементов прямоугольной формы, специально для нее были спроектированы и реа-

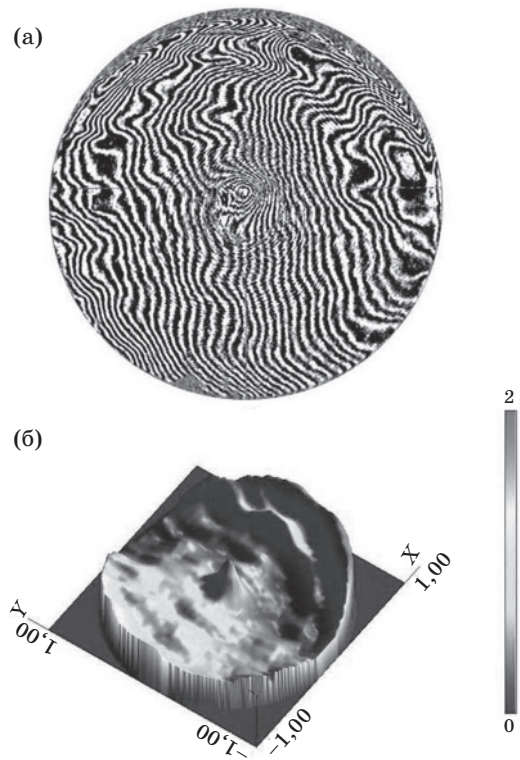


**Рис. 1.** Стенд для интерферометрического контроля внеосевых параболических зеркал диаметром до 400 мм.

лизованы схема контроля плоскостей “Физо-630” и схема контроля деформаций проходящего волнового фронта “Физо-400” и “Физо-500”, реализован макетный вариант схемы Ричи–Коммона для контроля плоских поверхностей диаметром до 800 мм.

Все стенды снабжены устройствами видеоввода для облегчения процедуры ввода и расшифровки данных контроля.

Не менее важным оказалось также наличие средств технологического контроля неполированных поверхностей и поверхностей с большими отклонениями от заданного профиля. Для этого на нашем предприятии используется координатно-измерительная машина (КИМ) “Mistral 07 07 05” производства фирмы *Brown & Sharpe*. Штатное и дополнительно разработанное программное обеспечение позволило автоматизировать процесс измерений, проводящийся практически без вмешательства оператора [2]. В результате, по завершению этапа шлифовки и предварительной полировки глубокой асферики с использованием данных контроля КИМ отклонение профиля от заданного, как правило, не превышает 2–3 мкм, что подтверждается данными последующего интерферометрического контроля. Для примера на рис. 2 приведены интерферограмма и топограмма внеосевого параболического зеркала (диаметр 145 мм, фокусное расстояние 200 мм, внеосевое смещение 96 мм, максимальная асферичность 400 мкм) после завершения асферизации (22 ч) и доводки по результатам контроля на КИМ “Mistral” (45 ч).



**Рис. 2.** Интерферограмма (а) и топограмма (б) отклонений внеосевого парабоида после завершения асферизации и предварительной доводки.

## Методика и программное обеспечение

В части методики и программного обеспечения работа включала исследование процесса полирования и шлифования оптических элементов из стекла и ситалла малоразмерным инструментом, разработку алгоритмов и программ расчета технологических режимов обработки, а также разработку программного обеспечения для обработки результатов контроля.

Удалось достичь значительного повышения производительности обработки, в первую очередь, за счет интенсификации режимов обработки, разработки методики оптимального чередования способов обработки (переходов), включая шлифовку микропорошками, предсказуемую коррекцию формы полировкой упругим инструментом и заглаживание инструментом с вязкой подложкой.

Первые версии программного обеспечения были реализованы на малопроизводительных ЭВМ, где приходилось уделять большое внимание экономии вычислительных ресурсов. На этом этапе авторами были разработаны двумерные алгоритмы расчета времени пребывания ин-

струмента и моделирования процесса обработки, которые базировались на теоретически прочитанных и экспериментально промеренных профилях съема в сечении, перпендикулярном направлению упорядоченного набора равноотстоящих конгруэнтных траекторий. В дальнейшем программное обеспечение было перенесено на современную вычислительную базу и усовершенствовано. В настоящее время используется технологическое программное обеспечение, возможности которого включают расчет программ асферизации и доводки асферических внеосевых элементов второго и высших порядков, в том числе не обладающих осевой симметрией, а также трехмерное моделирование результатов обработки. Также было разработано оригинальное программное обеспечение для обработки интерферограмм и расчета топограмм контролируемых поверхностей. Весь набор операций по созданию и редактированию проектов оптических деталей, обработке результатов контроля, расчету технологических программ объединен в рамках технологической программы “менеджер деталей” CCAPS, пример окна которой приведен на рис. 3. Доступные операции над рабочим проектом в

виде древовидного списка выведены на левой панели главного окна программы. При выборе текущей операции справа отображается соответствующая диалоговая или информационная панель, позволяющая редактировать данные и проводить необходимые расчеты.

### Перспективы технологии

В настоящее время прогресс в мировой оптической промышленности достиг того уровня, когда управляемое формообразование оптических поверхностей перестает быть экспериментальной технологией и становится стандартом де-факто. Свидетельством тому служит начавшийся серийный выпуск оптических станков с ЧПУ, например, фирмами *Zeeko* (Великобритания), *QED Technologies*, *Moore Nanotechnology Systems* (США), *Schneider Opticmashinen* (Германия) и др. [3, 4, 5, 6]. Особенно впечатляюще выглядит прорыв, связанный с применением управляемого микрошлифования алмазным инструментом и магнито-реологической полировки [4, 5, 6]. Регулярно появляются публикации, свидетельствующие о том, что практически все значитель-

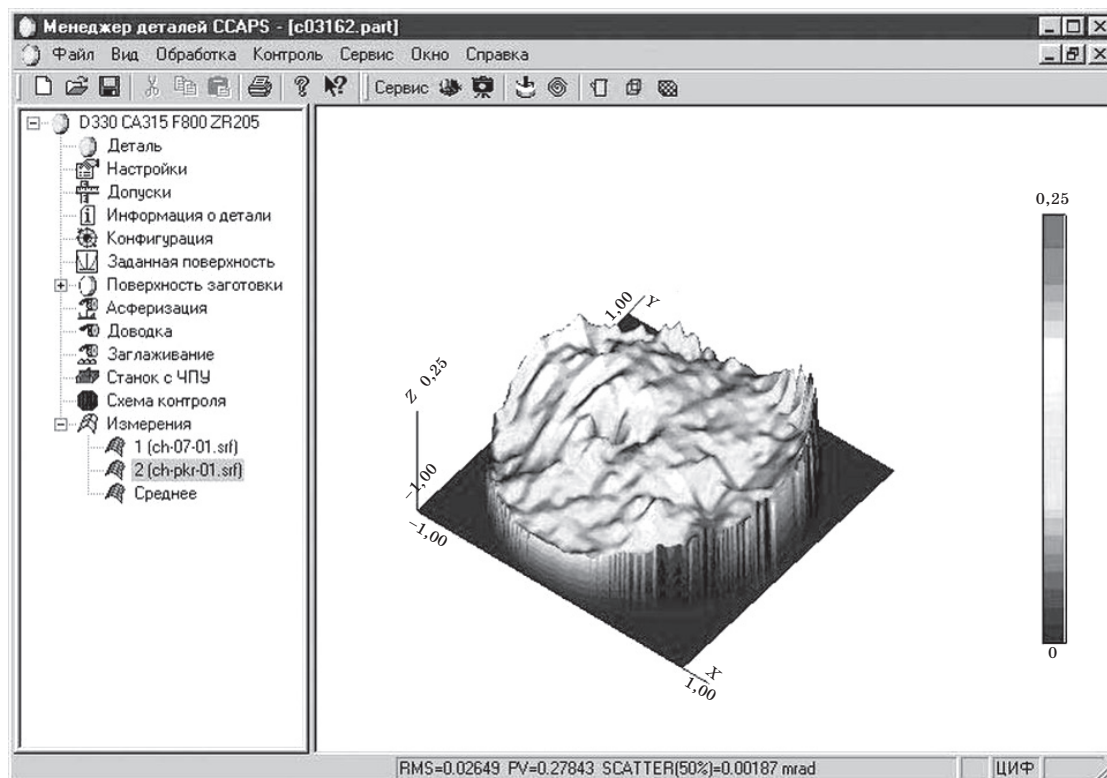


Рис. 3. Технологическая программа CCAPS.



ные проекты, предусматривающие изготовление крупногабаритной асферики, не обходятся без применения компьютерно-управляемого формообразования [7, 8, 9]. В свою очередь, прогресс в технологии стимулирует конструкторов на более широкое применение асферической оптики в оптико-электронных системах, что приводит к возрастанию спроса на данную продукцию.

Очевидно, что для оптического производства необходим переход от традиционной технологии, ориентированной на опыт и умение индивидов, к автоматизированной и в большой степени предсказуемой машинной обработке. При этом все еще существенные на данный момент различия в оборудовании, технологии и, как результат, в стоимости производства сферической и несферической оптики имеют тенденцию к выравниванию. Для нашего предприятия это означает необходимость усиления ориентации оптического производства на изготовление пользующейся возрастающим спросом асферики при одновременном внедрении элементов прогрессивных технологий в производство традиционной оптики. Если за первые 10 лет существования участка асферической оптики в НИИКИ было изготовлено порядка 300 асферических оптических элемента диаметром от 50 до 500 мм и асферичностью до 1500 мкм, то в настоящее время объем годового выпуска достиг сотни и более элементов средних (200–500 мм) габаритов. Обеспечение высокоэффективного производства в таких объемах требует проведения работ в следующих направлениях:

– повышение производительности полирования, улучшение его стабильности и повторяемости при одновременном обеспечении повышенных требований к чистоте и шероховатости поверхности за счет совершенствования конструкции инструмента или применения новых принципов обеспечения съема,

– применение современных станков для быстрой генерации плоских, сферических и асферических поверхностей путем микрошлифования алмазным инструментом,

– развитие метрологической базы для повышения точности, пространственного разрешения результатов контроля, уменьшения трудоемко-

сти обработки данных за счет применения современных методов и технических средств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бородин В.Г., Мигель В.М., Парака А.В., Чарухчев А.В., Чекаль В.Н.* Внеосевое параболическое зеркало для концентрации излучения пикосекундного лазера // *Оптический журнал*. 2002. Т. 69. № 1. С. 65–68.
2. *Чекаль В.Н., Чудаков Ю.И., Шевцов С.Е.* Применение координатно-измерительных машин для оптимизации технологии автоматизированного формообразования оптических поверхностей // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 11. С. 82–87.
3. *Walker D.D., Beaucamp A.T.H., Brooks D., Freeman R., King A., McCavana G., Morton R., Riley D., Simms J.* Novel CNC polishing process for control of form and texture on aspheric surfaces // *Proc. 47th Annual Meeting of SPIE, Seattle*. 2002. V. 4451. P. 267–276.
4. *Stephen D.J.* Innovations in Polishing of Precision Optics. Part 2 // *Convergence – Newsletter of the Center for Optics Manufacturing*. University of Rochester, Rochester, New York. 2003. V. 11. № 2.
5. *Fess E.* MRF Polishing of Microground Surfaces. Part I – Deterministic Micro Grinding // *Convergence – Newsletter of the Center for Optics Manufacturing*. University of Rochester, Rochester, New York. 2003. V. 10. № 2.
6. *Fess E.* MRF Polishing of Microground Surfaces. Part II – Magnetorheological Finishing // *Convergence – Newsletter of the Center for Optics Manufacturing*. University of Rochester, Rochester, New York. 2002. V. 10. № 3.
7. *Martin H.M., Allen R.G., Burge J.H., Dettmann L.R., Ketelsen D.A., Miller S.M., Sasian J.M.* Fabrication of mirrors for the Magellan telescopes and the Large Binocular Telescope // *Proc. SPIE*. 2003. V. 4837. P. 609–618.
8. *Andersen T., Ardeberg A., Goncharov A., Owner-Petersen M., Riewaldt H., Snell R., Becquers J., Walker D.* Euro50 extremely large telescope // *Proc. SPIE conference “Future Giant Telescopes”, Hawaii*. 2003. V. 4840. P. 214–225.
9. *Mast T.S., Nelson J.E., Sommargren G.E.* Primary Mirror Segment Fabrication for CELT // *Proc. SPIE*. 2000. V. 4003. P. 43–58.