

НАНОРАЗМЕРНАЯ ОБРАБОТКА

И. Савельев, ssav@x-energo.com, ООО «Прецизионные технологии», Санкт-Петербург

Представлены результаты создания элементов малоразмерной рентгеновской оптики. Кинематическая обработка эллиптического цилиндра осуществляется методом полирования малоразмерным инструментом. Предлагаемая система может быть адаптирована к изготовлению фасеточных объективов.

Быстрое развитие приборостроения ультрафиолетового и рентгеновского диапазонов выдвигает все более высокие требования к качеству используемых оптических компонентов.

Одной из возможных технологий получения изделий с точностью формы около 50 нм может служить технология полирования малоразмерным инструментом. Принципиально данная технология для производства оптических деталей появилась довольно давно и достаточно хорошо разработана [1, 2]. В частности, имеется отечественное оборудование (станки серии АД [2, 3] проекта и выпуска 70-х годов XX века), которое до сих пор успешно используют на отечественных предприятиях. За рубежом подобное оборудование постоянно совершенствуется, и в Европе, и в Азии [4–7] выпускают его широкую номенклатуру как под собственно технологию полирования малоразмерным инструментом, так и под смежные технологии. Известны хорошие обзоры работ в этой области [1].

Однако стоимость такого оборудования весьма значительна, и бюджет даже успешной небольшой западной компании не всегда может позволить ей такое приобретение. Особенно это касается случаев, когда требуются какие-либо доработки оборудования и программного обеспечения, как, например, в задаче, которой посвящена данная статья. В то же время как создание самого оборудования, необходимого для реализации технологии полирования малоразмерным инструментом, так и набор

контрольно-измерительной техники и вспомогательного оснащения вполне доступны по цене. И даже могут выпускаться небольшими компаниями при не слишком больших затратах.

Данная статья не ставит задачи детального описания всех особенностей полирования малоразмерным инструментом. Более того, результаты, представленные здесь, не могут претендовать на место среди самых передовых достижений в обсуждаемой области. Сделана попытка показать реальные возможности создания высокотехнологичного центра наноразмерной обработки весьма ограниченными силами, которые соответствуют уровню очень небольшого предприятия с ограниченными ресурсами. Предлагаемая работа изначально была

нацелена на разработку технологии производства компонентов рентгеновской оптики. В связи с этим создавалась не универсальная система, а специализированная. Задача состояла в создании трех видов изделий:

- Stencils – мастер-шаблоны, с которых снимаются реплики для производства многослойных интерференционных структур.
- Mandrels – шаблоны, используемые для производства реплик тел вращения.
- 3D optics – сегменты, форму которых можно представить как канавку переменной толщины по длине сечения.

Характерные размеры изделий: 50–400 мм в направлении оптической оси и 20–200 мм в поперечном направлении. Форма поверхности – эллиптиче-

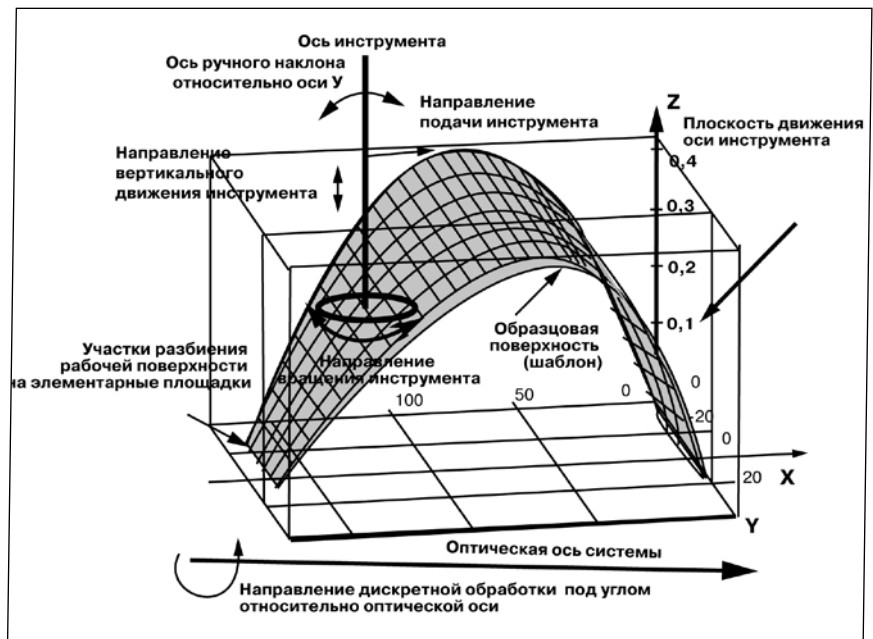


Рис.1. Общая схема обработки цилиндрической поверхности методом полирования малоразмерным инструментом

ская, параболическая либо табличная. Общая схема процесса полирования малоразмерным инструментом детали типа stencil представлена на рис.1. Для обработки деталей указанных групп был разработан пятиосевой станок. Управление всем комплексом производится системой PoliSoft, специально разработанной компанией ООО «Прецизионные технологии», CAM (Computer Aided Machining – компьютерная система, обеспечивающая машинную обработку).

Принципиальной особенностью полирования малоразмерным инструментом является сложная зависимость, связывающая профиль удаляемого материала с характеристиками инструмента, обрабатываемого материала и режимами обработки. Такую зависимость будем называть TIF (Tool Influence Function – функция влияния инструмента). В CAM PoliSoft форма TIF при фиксированных характеристиках материала, инструмента и угла наклона оси полировальника представляется в виде суммы двух пиков, имеющих форму распределения Пирсона. Форма каждого пика определена вектором, зависящим от четырех параметров, а форма всей TIF – вектором восьми параметров. Собственно процессу обработки детали предшествует достаточно сложное исследование, в ходе которого определяется изменение TIF в пределах предполагаемой области варьирования технологических параметров, которое завершается построением регрессионных моделей, обеспечивающих расчет TIF для произвольной комбинации варьируемых параметров. Параметры TIF (TIF_par) зависят от режимов обработки: V – скорости подачи полировальника, P – силы его поджатия и W – скорости его вращения. Эта зависимость с учетом подобранных коэффициентов аппроксимации $\{a\}$ приобретает вид $TIF_par = a \cdot V^{a_v} \cdot P^{a_p} \cdot W^{a_w}$.

На рис. 2 в качестве примера приведен график зависимости для одной из используемых комбинаций «материал подложки – суспензия – инструмент» максимального съема стекла от скорости подачи шарового полировальника при фиксированных значениях остальных параметров обработки. Размер обрабатываемой полировальником в текущий момент зоны невозможно напрямую связать с размерами используемого инструмента, что принципиально отличает данный вид механической обработки от других, например фрезерования.

Для получения поверхности высокого качества необходимо осуществлять перекрытие зон обработки в соседних точках поверхности. Указанное обстоятельство принципиально по сравнению с другими видами механической обработки, усложняет расчет режимов обработки поверхности вдоль выбранной траектории и требует реализации оптимизационных процедур, обеспечивающих увязку параметров обработки во всех точках выбранной траектории инструмента. В большинстве случаев не удается получить требуемое приближение к заданной по-

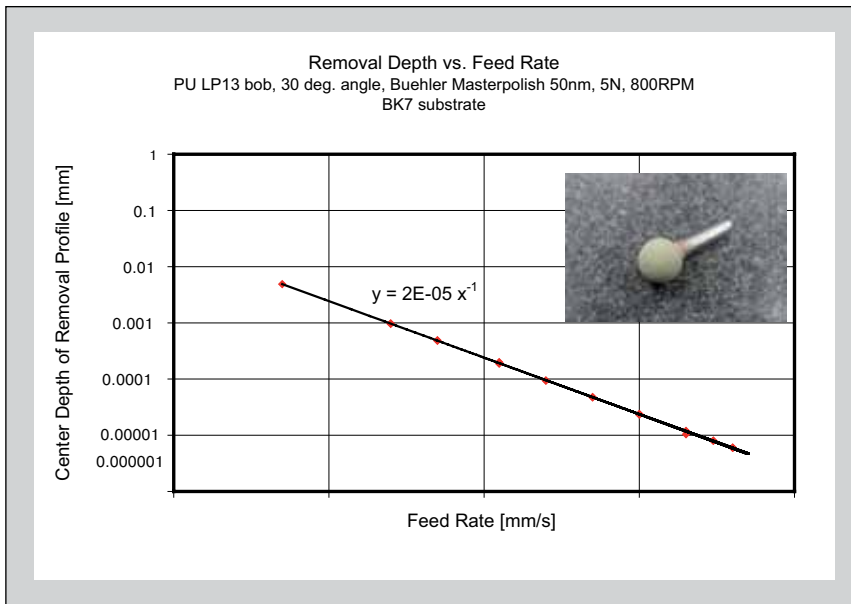


Рис.2. Зависимость величины максимального съема стекла BK7 от скорости подачи шарового полиуретанового полировальника: диаметр 40 мм, расположение под углом 30° к обрабатываемой поверхности, усилие поджатия шпинделя к детали 5 Н, скорость вращения шпинделя 800 об/мин

верхности за одну итерацию и приходится вести обработку в несколько проходов. Однако сходимость данного итерационного процесса достаточно высока, и, как показывает практика, при правильном планировании обработки удастся обеспечить удаление не менее 60% припуска за проход на черновых режимах обработки.

Учет указанных выше особенностей рассматриваемой технологии возможен только с использованием специализированной САМ-системы, которая является ключевым элементом всей технологии. Общая струк-

тура САМ PoliSoft, разработанная нами для полирования малоразмерным инструментом включает:

- функцию задания требуемой формы изделия;
- набор процедур по определению формы конкретной заготовки;
- функцию задания оптимальной траектории обрабатываемого инструмента;
- процедуры по определению оптимальных режимов вдоль траектории обработки, обеспечивающих наилучшее приближение к заданной форме и шероховатости поверхности;

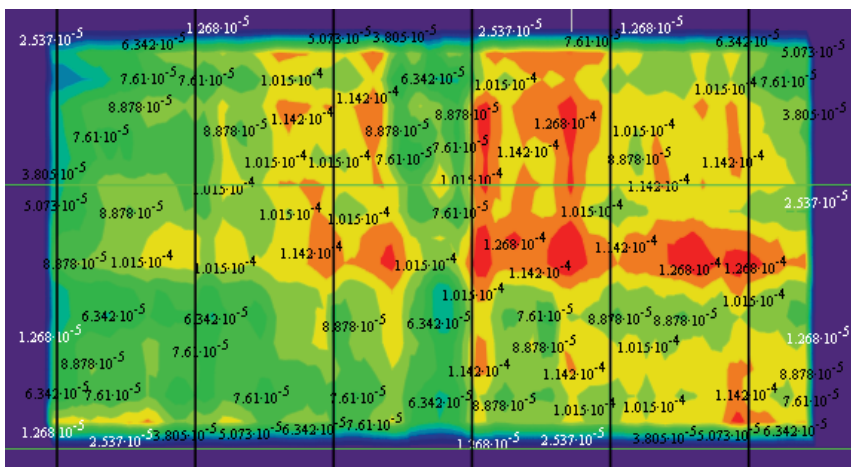


Рис.3. Отклонения обработанной поверхности от эллиптического цилиндра (положение центра поверхности относительно центра эллипса $X = -300$ мм, размер зоны обработки 80×15 мм в ширину)

- генерацию G-кода для ЧПУ станка полирования малоразмерным инструментом;
- программную поддержку функционирования станка;
- набор процедур по определению технологической модели процесса обработки для определенной комбинации материал – инструмент;
- процедуру формирования технологической документации;
- вспомогательные средства по работе с базами данных, используемые САМ.

Особо следует сказать о САИ (Computer Aided Inspect) – системе, обеспечивающей измерения. Применение таких классических методов, как интерференционный, связано с заметными трудностями и базируется на использовании очень дорогостоящего оборудования.

Для контроля поверхности мы использовали метод, базирующийся на применении достаточно дешевого устройства – однокоординатного длинно-базового профилометра. Реконструкция 3D-поверхности детали осуществлялась на основе совместной обработки системы профилей, снятых в двух ортогональных направлениях. В качестве примера результата использования описанного оборудования и технологии приведем результат обработки цилиндрической оптики. На рис.3 приведены результаты измерения сегмента эллиптического цилиндра, полученного из плоской заготовки стекла BK7.

Получившаяся система не идеальна и специализирована на изготовление элементов отражательной рентгеновской оптики, но она с незначительными переделками оборудования может быть применена и для решения других нестандартных задач. Например, описанную в данной статье систему можно адаптировать к изготовлению фасеточных объективов, описанных в [8]. Основные трудности при этом будут связаны с модификацией измерительной части (САИ).

Все ключевые элементы технологии, к каковым следует отнести: собственно станок для полирования малоразмерным

инструментом, САМ-систему, САI-систему и собственно технологические наработки, были спроектированы, изготовлены и запущены в работу примерно за год при весьма скромном бюджете разработки силами международного коллектива из трех человек, каждый из которых к моменту начала разработки не имел практического опыта оптического производства. Правда, за рамками данной статьи остались вопросы обеспечения климат-контроля, затраты на который в описываемом случае оказались больше, чем на остальные составляющие. Надеемся, что полученный опыт будет применим и на отечественной ниве.

Автор выражает признательность коллегам за плодотворное сотрудничество. Организация проекта и разработка технологии – Bodo Ehlers, RIT. Разработка станка – Jon Savina, freelancer. Первичные результаты обмера, по которым построена поверхность, представленная на рис.3, получены Bodo Ehlers. Им же получены данные, представленные на рис. 2. Его роль в успешной реализации данного проекта трудно переоценить. Кроме того, автор хочет поблагодарить проф. В.Е.Привалова (СПбГПУ) за поддержку данной работы и полезные советы. Безусловно, благодарности заслуживают и рецензенты статьи, взявшие на себя труд по ее оценке и сделавшие ряд ценных замечаний. Автор постарался максимально учесть их при доработке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Jacobs S.** International Innovations in Optics Finishing. – Current Developments in Lens Design and Optical Engineering. Proc. of SPIE, v.5623.
2. **Михайлов В., Парака А., Чекаль В. и др.** Технология автоматизированного формообразования для производства оптических элементов. – Оптический журнал, 2009, т. 76, №9.
3. **Абдулкадыров М., Горшков В., Семенов А. и др.** Определение абсолютного съема стекла и анализ погрешностей автоматизированного формообразования оптических поверхностей на станках серии АД по программе АД-1.– Оптико-механическая промышленность, 1990, №1.
4. **Walker, D. et al.** The Precessions Process for Efficient Production of Aspheric Optics for Large Telescopes and Their Instrumentation. – SPIE Astronomical Telescopes and Instrumentation Meeting, Hawaii, August, 2002.
5. **Walker D., Beaucamp A., Brooks D. et al.** New Results from the Precessions Polishing Process Scaled to Larger Sizes. – Proc. SPIE Conference "Optical Fabrication, Metrology and Materials Advancements for Telescopes", Glasgow, June, 2004, v. 5494.
6. **Kim D., Kim S.** Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes. – Optics express, 2005, v. 13, №3.
7. www.lzos.ru
8. **Соломатин В.** Фасеточное зрение: перспективы в оптико-электронных системах. – Фотоника, 2009, №1.