

ШЛИФОВАНИЕ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОЛНОРАЗМЕРНЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

© 2012 г. В. Г. Кукс, канд. техн. наук

НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

E-mail: progipo@tnpko.ru

В статье кратко излагаются результаты разработки и применения в НПО ГИПО полноразмерного инструмента с асферической рабочей поверхностью для шлифования. Асферизация производится свободным абразивом на отечественных станках “ПЛАНЕТА”, разработанных в 1970–80-х годах специалистами НПО ГИПО и Минского механического завода и изготовленных в г. Сморгони (Белоруссия).

Ключевые слова: асферизация, асферичность, коррекция, полноразмерный инструмент, прецизионный, шлифовальный.

Коды OCIS: 220.1250.

Поступила в редакцию 18.05.2011.

За полвека существования отдела асферической оптики в НПО ГИПО получен большой опыт разработки изготовления различных видов оптических деталей диаметром от 20 до 600 мм с асферическими поверхностями (АП) вращения в единичном и серийном производстве, в том числе с внедрением инструментов, станков и техпроцессов на ряде предприятий отрасли [1]. Подавляющая часть этих деталей, начиная с 1962 г. и по настоящее время, изготавливаются с применением полноразмерных инструментов. Шлифование выполнялось упругодеформируемыми многолепестковыми инструментами с профилем переменной толщины [2, 3], а для полирования, в зависимости от величины и градиента асферичности, наряду с упругодеформируемыми применялись и жесткие инструменты, в том числе с использованием упругоэластичного полирующего подслоя.

В силу ряда объективных причин последние годы упругодеформируемые инструменты не используются, тем не менее идея применения полноразмерного шлифовальника для асферизации остается привлекательной. Речь идет об АП с асферичностью, как правило, более 10 мкм.

Ряд исследований НПО ГИПО посвящен возможности создания такого инструмента и на его основе – разработки техпроцесса на базе станков “ПЛАНЕТА” [2, 4]. При этом практический интерес может представлять шлифование с погрешностью по осевой координате не более 2–3 мкм, что необходимо для после-

дующего производительного полирования в серийном производстве асферической оптики, особенно, если речь идет о твердых материалах деталей, таких как кремний. В единичном производстве можно допустить несколько большую погрешность, например для германия, если асферичность исчисляется десятками и сотнями микрометров.

Прозрачная идея применить полноразмерный инструмент, рабочая поверхность которого сформирована по уравнению требуемой АП детали, но с обратным знаком (была предложена доктором техн. наук А.В. Лукиным), на первый взгляд выглядит перспективной, однако она достаточно спорная. Гипотетически возможными представляются два варианта применения полноразмерного асферического шлифовальника (ПШ).

Вариант 1. Ось инструмента совпадает с геометрической осью асферизируемой детали, и шлифование производится только за счет вращательного движения ПШ относительно детали (по предложению А.В. Лукина) при некоторой рабочей осевой нагрузке.

Вариант 2. Ось ПШ не совпадает с осью детали, а именно: вершина инструмента быстро движется поступательно вокруг вершины детали по окружности, радиус которой может составлять от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Одновременно инструмент принудительно медленно поворачивается относительно детали. Такая кинематика заложена в конструкции станков семейства

“ПЛАНЕТА” и была разработана для асферизации упругодеформируемым инструментом и полноразмерным жестким полировальником.

Независимо от варианта, при обработке свободным абразивом, согласно общепринятой гипотезе Престона [5], величина линейного износа (съема материала) h обрабатываемой, т. е. в данном случае асферизируемой поверхности, определяется зависимостью

$$h = \int_0^t A p v dt,$$

где A – параметр, зависящий от технологических факторов, таких как материал детали и инструмента, состава абразивного слоя, температуры;

p – удельное давление инструмента на деталь,

v – скорость в точке инструмента относительно детали,

t – время обработки.

В свою очередь параметры p и v зависят от координат обрабатываемой точки –

$$p = p(\rho, \alpha),$$

$$v = v(\rho, \alpha),$$

где ρ и α – полярные координаты точки на АП.

Таким образом, есть только три независимых параметра, которые определяют процесс абразивной обработки любой оптической поверхности и определяют величину съема h : давление p , скорость v и время t .

В качестве исходной поверхности заготовки, как правило, берется ближайшая сферическая или плоская поверхность. Отступление заданной чертежом АП от ближайшей сферы, например по осевой координате, есть асферичность. Следовательно, для получения требуемой АП вращения всегда необходимо с заготовки снять *позонально переменный* слой материала во всех кольцевых концентрических зонах асферизируемой поверхности. Для этого необходимо обеспечить возможность целенаправленного управления съемом материала позонально с помощью хотя бы одного из указанных параметров. Применение полноразмерного инструмента, рабочая поверхность которого выполнена по уравнению требуемой АП готовой детали, при 100%-ном покрытии асферизируемой поверхности исключает такую возможность.

При обязательном для абразивной обработки перемещении инструмента относительно детали происходит их взаимный износ, который в данном случае сопровождается непрерывным

неуправляемым изменением формы как асферизируемой поверхности, так и рабочей поверхности инструмента. Закономерности и количественные характеристики этого процесса представляют собой сложную прикладную задачу, в том числе теоретической механики. Применение потенциально неизнашиваемого, например, алмазирования¹ инструмента может снять лишь часть проблемы, поскольку остается неуправляемость съемом материала детали. Так, при работе гипотетическим инструментом по варианту 1 добиться высокой точности шлифования невозможно уже потому, что при вершине полноразмерных, например линзовых, деталей рабочая скорость и съем материала будут практически близки к нулю, а на краю детали – максимальными. Компенсировать эту ситуацию нечем.

Автор выбрал другой подход к разрабатываемому инструменту. Предложено использовать форму рабочей поверхности шлифовальника в качестве суммарного управляющего параметра для целенаправленного распределения съема материала по зонам, чтобы сформировать ожидаемую шлифованную АП детали с требуемой точностью. Такая гипотеза имеет право на существование и не содержит неразрешимых противоречий. Конечно, в каждом конкретном случае искомая форма АП инструмента будет зависеть и от выбранных режимов обработки (величины смещения инструмента и скорости его движения относительно детали, рабочего давления инструмента на деталь, времени обработки), и от материала инструмента (алюминиевого сплава или латуни), и от применяемого абразива (величины зерна и его твердости). Однако при принятом подходе нет необходимости выявлять и учитывать влияние каждого из перечисленных факторов в отдельности. В данном случае за конечный результат, т. е. за форму шлифованной АП детали, “отвечает” форма рабочей поверхности инструмента, которая неизбежно будет отличаться от формы требуемой АП детали. Дело остается за “малым” – определить искомую форму. Очевидно, как отмечалось выше, найти уравнение искомой рабочей поверхности инструмента чисто аналитически расчетным путем не представляется возможным. Тем не менее, как показал опыт, положительное решение проблемы существует.

¹ Под термином “алмазированный” понимается инструмент с нанесенным на его рабочую поверхность упрочняющим слоем алмазных зерен, закрепленных металлической связкой.

Выбранная методика исследований по принципу последовательных приближений в общих чертах выглядит так.

Этап 1. Определяется первичная рабочая поверхность инструмента (РПИ-1), исходя из предпосылки, что она должна отличаться от требуемой АП детали по зонально пропорционально величине асферичности. В этом случае уравнение РПИ-1 несложно определить аналитически путем коррекции коэффициентов уравнения требуемой АП детали. Разработанная предварительная методика такой коррекции и соответствующие компьютерные программы. Найденное таким образом уравнение РПИ-1 загружается в компьютер станка для проточки. Эта операция должна выполняться на прецизионном станке с программным управлением, например на станке алмазного точения, с погрешностью не более 2 мкм, так как в противном случае результат коррекции нельзя считать достоверным и эффективным при необходимости последующей коррекции. Кроме того, от точности проточки напрямую зависит количество коррекций, а также точность и воспроизводимость шлифования. Получаем первичный шлифовальный диск (ПШ-1). Этим инструментом на станке «ПЛАНЕТА» производится шлифование сферической заготовки и замеряются (с использованием, например, голографического асферометра) зональные отклонения шлифованной асферической поверхности (ШАП-1) детали от требуемой АП, для чего ШАП-1 частично равномерно полируется.

Как показал опыт, обычно погрешность шлифования инструментом ПШ-1 достигает 25–15% от величины асферичности. Объяснение очевидно: закономерность зонального съема материала детали не совпадает с закономерностью зонального распределения асферичности.

Этап 2. На этом этапе выполняется коррекция уравнения РПИ-1, найденного на этапе 1. Делается это из предпосылки, что искомая на этапе 2 поверхность РПИ-2 должна отличаться от РПИ-1 зонально пропорционально отклонениям ШАП-1 детали от требуемой АП. Находится, как это описано в этапе 1, уравнение РПИ-2, по которому протачивается шлифовальный диск ПШ-2. Этим инструментом шлифуется сферическая заготовка, и замеряются отклонения полученной ШАП-2 от требуемой АП детали.

Последующие коррекции (в случае их необходимости) выполняются по тем же прави-

лам. Каждая коррекция приближает получение искомого уравнения рабочей поверхности инструмента. Большое значение при этом имеет точность установки реза в исходное положение, т. е. совмещение его режущей кромки с осью инструмента.

Коррекцию, после которой точность шлифования достигает 1–2 мкм, можно признать окончательной, как и найденную при этом форму и уравнение рабочей поверхности шлифовальника. При изготовлении инструмента из алюминиевого сплава или латуни требуется несколько коррекций в зависимости от величины асферичности АП детали. Каждая проточка инструмента сопровождается съемом стружки толщиной 20–50 мкм. При большой асферичности суммарная толщина снятого слоя, как правило, соизмерима с величиной этой асферичности. Чтобы свести число коррекций к единственной, необходим анализ статистических данных применения инструментов при шлифовании многих деталей с разными АП. На их основе можно найти общие эмпирические зависимости формы рабочей поверхности шлифовальника от формы требуемой АП детали при конкретной комбинации технологических параметров, режимов обработки и материалов детали и инструмента.

Слабым местом описанных инструментов из алюминиевого сплава и латуни является их достаточно быстрый износ. Одним таким инструментом в зависимости от величины асферичности требуемой АП можно отшлифовать 1–5 деталей, после чего необходимо восстанавливать его рабочую поверхность. Эта операция занимает не более 1,5–2 часов при диаметре инструмента 100–120 мм и снятии слоя металла в 30–100 мкм. Таким образом, суммарный «ресурс» одного инструмента может достигать порядка 100 деталей, что делает расчет, изготовление и применение такого инструмента экономически и технологически оправданным в серийном производстве.

Тем не менее, вопрос повышения износостойкости инструмента остается актуальным. Для его решения можно было бы использовать нанесение на рабочую поверхность алмазонасного покрытия из алмазных зерен, закрепленных, например, в никелевой связке с применением гальванической ванны. Такая технология успешно использовалась многие годы при изготовлении упругодеформируемых инструментов. Привлекательность алмазирования на пер-

вый взгляд очевидна, поскольку из процесса шлифования исключается неопределенность износа инструмента. Однако целесообразность его применения в данном случае весьма спорна с точки зрения как экономической, так и технологической. Имеется в виду следующее:

- во-первых, процесс алмазирования трудоемкий;

- во-вторых, перед каждой следующей коррекционной проточкой необходимо алмазосносный слой снять и после проточки снова нанести, что существенно удлиняет и удорожает работу;

- в-третьих, производительность шлифования алмазировавшимся инструментом будет на порядок ниже, чем неалмазировавшимся. Дело в том, что при абразивном шлифовании алмазосносный слой является упрочняющим покрытием, где алмазные зерна играют роль практически неизнашиваемых, но не режущих элементов. Есть многолетний опыт применения полноразмерных упругодеформируемых шлифовальных с таким покрытием. Было установлено, что по мере выработки связки, удерживающей алмазные зерна, на глубину, равную размеру зерна свободного абразива, эффективная рабочая поверхность инструмента сводится к площади выступающих алмазных зерен. Эта площадь составляет менее 10% от полной рабочей поверхности инструмента. При этом велика вероятность нанесения грубых царапин на асферируемой поверхности, если выход алмазных зерен из связки неодинаков по высоте. Для снятия этой проблемы, вероятно, можно восстанавливать выработанную связку, но чтобы утверждать это, требуются соответствующие исследования.

Таким образом, задача получения практически неизнашиваемого и высокопроизводительного инструмента для шлифования до

настоящего времени остается нерешенной. Неалмазировавшийся инструмент успешно применяется в НПО ГИПО в последние годы: асферируются как единичные, так и серийные детали из оптических стекол, германия и кремния диаметром от 20 до 150 мм при асферичности до 150 мкм с АП более чем 20 видов, главным образом, высших порядков для линзовых и зеркально-линзовых объективов. В ходе исследований была экспериментально доказана перспективность применения полноразмерных жестких шлифовальных диаметром более 500 мм. Во всех случаях применялись инструменты из сплава АМГ-6 либо из латуни.

К недостаткам рассматриваемого инструмента следует отнести износ рабочей поверхности, невозможность использовать в качестве заготовки деталь с неизмеренной произвольной формой поверхности, подлежащей асферизации.

В числе достоинств можно отметить следующие:

- малозатратную подготовку производства,
- возможность получения АП с широким диапазоном параметров,

- высокую производительность по сравнению с другими методами шлифования АП свободным абразивом,

- возможность использования ПШ в качестве полировальника после нанесения на его рабочую поверхность полирующего слоя,

- возможность его применения на любом оптико-механическом предприятии, не имеющем дорогостоящего импортного специализированного оборудования для асферизации, но имеющем недорогой отечественный станок, например “ПЛАНЕТА-100/250”, для деталей диаметром от 20 до 300 мм и прецизионный металлообрабатывающий (например токарный) станок с программным управлением.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Кукс В.Г., Хуснутдинов А.Г. Получение асферических оптических поверхностей вращения в широком диапазоне технологических параметров // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 36–43.
2. Карлин О.Г., Кукс В.Г., Липовецкий Л.Е., Лукин Л.В., Мустафин К.С., Хабиров А.З., Хуснутдинов А.Г. Изготовление и контроль асферической оптики // М.: ЦНИИ информации, 1980. С. 21–40.
3. Карлин О.Г., Кукс В.Г. Получение оптических деталей с асферическими поверхностями посредством упругого инструмента // ОМП. 1966. № 12. С. 57–61.
4. Кукс В.Г. Определение оптимальных режимов асферизации на станках “Планета” // ОМП. 1980. № 2. С. 24–27.
5. Preston F.W. The theory and design of plate glass polishing machines // J. Glass Technol. 1927. № 11. P. 214–256.