

Е. С. Мишечкин¹✉, М. П. Егоренко¹, Н. А. Гурин^{2,3}

Совершенствование технологии глубокого шлифования оптических деталей: анализ параметров и пути оптимизации

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Новосибирский приборостроительный завод, г. Новосибирск, Российская Федерация

³Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: mishechkines@mail.ru

Аннотация. Данная работа представляет собой исследование в сфере обработки оптических деталей. В работе проведен анализ технологических процессов глубокого шлифования оптических деталей с акцентом на повышение точности геометрической формы и снижение шероховатости поверхности. На основании изучения научной, технической и технологической литературы за последние пятьдесят лет проанализированы существующие методы шлифования оптических деталей. Описаны преимущества метода глубокого шлифования оптических деталей. Исследовано влияние абразивных материалов (алмаз, корунд, нитрид бора) и режимов обработки (скорость вращения, давление) на качество поверхности. Разработаны рекомендации по минимизации дефектов и повышению производительности. Результаты исследований показывают, что использование алмазных абразивов снижает шероховатость оптических поверхностей на 20 % по сравнению с применением корундов. Предложены пути интеграции автоматизированных систем контроля для улучшения стабильности технологических процессов.

Ключевые слова: глубокое шлифование, оптические детали, абразивные материалы, шероховатость, ЧПУ

E. S. Mishechkin¹✉, M. P. Egorenko¹, N. A. Gurin^{2,3}

Improving the technology of deep grinding of optical parts: parameter analysis and optimization paths

¹Siberian State University of Geosystems and Technology, Novosibirsk, Russian Federation

²Novosibirsk Instrument-Making Plant, Novosibirsk, Russian Federation

³Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: mishechkines@mail.ru

Abstract. This paper is a study in the field of optical parts processing. The paper analyzes the technological processes of deep grinding of optical parts with an emphasis on increasing the accuracy of the geometric shape and reducing the surface roughness. The existing methods of grinding optical parts are analyzed using scientific, technical and technological literature over the past fifty years. The advantages of the method of deep grinding of optical parts are described. The effect of abrasive materials (diamond, corundum, boron nitride) and processing modes (rotation speed, pressure) on the surface quality is studied. Recommendations for minimizing defects and increasing productivity are developed. The results show that the use of diamond abrasives reduces the roughness of optical sur-

faces by 20 % compared to the use of corundum. The ways of integrating automated control systems to improve the stability of technological processes are proposed.

Keywords: deep grinding, optical parts, abrasives, roughness, CNC

Введение

Современные оптические системы требуют деталей с нанометрической точностью формы и минимальной шероховатостью оптических поверхностей. Глубокое шлифование, как ключевой этап обработки, сталкивается с проблемами, такими как неоднородность свойств материала, высокая глубина нарушенного слоя и низкая производительность [1,2]. Традиционные методы с использованием свободного абразива обеспечивают ограниченную точность, что делает актуальным поиск новых решений. Целью исследования является анализ влияния технологических параметров на качество глубокого шлифования и разработка рекомендаций по оптимизации технологического процесса.

В рамках подготовки научной статьи была выполнена систематизация и анализ информации, относящейся к процессам глубокого шлифования оптических деталей.

Материалы и методы

В качестве экспериментальной установки использовалась установка производство АО Новосибирский приборостроительный завод.

Работа осуществлялась на шлифовальном станке, оснащённом алмазным, корундовым и нитрид-боридным инструментом [3].

В качестве обрабатываемых материалов выбраны: оптическое стекло (марка К8), кварц, германий.

Параметры обработки определены в соответствии с рекомендациями, содержащимися в источниках:

- скорость вращения шпинделя: от 50 до 150 об/мин;
- давление поводка: от 60 до 100 кг;
- подача инструмента: от 0,5 до 5 мм/мин.

Методы оценки:

- профилометрия. Измерение шероховатости (Ra) с помощью прибора Mahr Surf LD260п;
- микроскопия. Анализ микротрещин и нарушенного слоя с использованием микроскопа.

Результаты

Сравнение абразивных материалов представлено в табл. 1.

Таблица 1

Влияние абразива на параметры обработки

Абразивный материал	Твердость, ГПа	Характеристики	
		Шероховатость оптической поверхности, Ra , нм	Глубина нарушенного слоя, мкм
Алмаз	100	15 ± 2	$2,5 \pm 0,3$
Корунд	20	25 ± 3	$5,0 \pm 0,5$
Нитрид бора	45	20 ± 2	$3,5 \pm 0,4$

На рис. 1. представлена зависимость изменения шероховатости поверхности оптической детали от скорости вращения шпинделя.

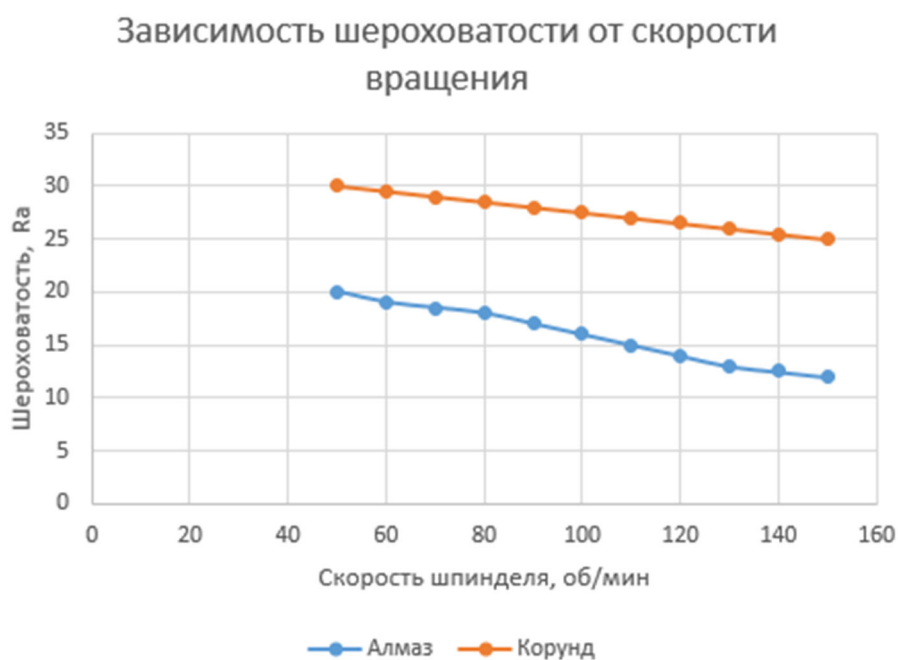


Рис. 1. Шероховатость поверхности оптических деталей при различных скоростях вращения шпинделя

На рис. 2. представлена зависимость изменения глубины нарушенного слоя поверхности оптической детали от давления поводка.

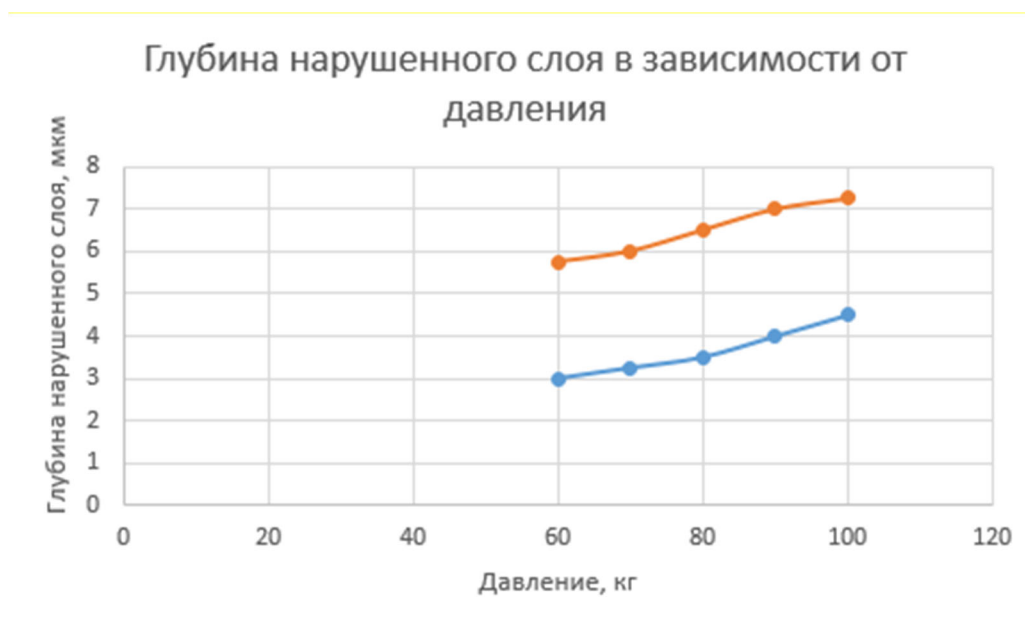


Рис. 2. Глубина нарушенного слоя поверхности оптической детали в зависимости от давления

Обзор преимуществ глубокого шлифования оптических деталей

Основные особенности глубокого шлифования оптических деталей:

- точность. Основная цель работы – получить поверхности с высокой степенью точности (с микрометрической или наноуровневой погрешностью) [4, 5], что критично для качества изображения в оптических системах, например, в телескопах, военных оптических приборах и лазерах;

- используемые материалы. Для шлифования оптических деталей обычно применяют абразивы с очень высокой твердостью, такие как алмаз, корунд или кубический нитрид бора [6], чтобы эффективно обрабатывать твердые и хрупкие материалы, из которых изготавливаются оптические элементы (стекло, кварц, керамика);

- процесс. Глубокое шлифование включает в себя применение абразивного инструмента (шлифовальный круг или диск), который движется по поверхности детали с высокой скоростью. Параметры, такие как скорость вращения круга, давление и подача, тщательно регулируются для минимизации повреждений и обеспечения нужной формы [7];

- технология и оборудование. Глубокое шлифование часто проводится на специализированных машинах, таких как шлифовальные станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Эти станки могут точно контролировать движение инструмента и детали, что позволяет получать поверхности с нужными параметрами;

- качество поверхности. Важным аспектом является качество поверхности после шлифования. Для оптических деталей критичными являются микрповреждения, такие как микротрещины или царапины, которые могут ухудшить их оп-

тические свойства. Поэтому процесс шлифования требует очень точного контроля [8, 9];

– применение. После шлифования детали часто подвергаются дополнительной обработке, например, полировке, чтобы улучшить оптические характеристики [10], особенно для компонентов, которые работают с лазерными лучами или световыми волнами, требующими высокой точности.

Шлифование – это обработка оптических деталей металлическим инструментом с помощью шлифовального порошка, который диспергирует верхний слой стекла, превращая его в трещеноватый. Глубокое шлифование позволяет уменьшить трещеноватый слой за счет определенной последовательности и большей величины съема припуска. Традиционное шлифование оптических деталей – быстрый процесс с небольшой глубиной резания, использующий различные абразивы и обеспечивающий качество поверхности меньшее, чем при глубоком, подходящий для широкого спектра материалов. В отличие от него, глубокое шлифование более медленный метод с большой глубиной резания, требующий прецизионного оборудования и алмазных абразивов, лучше подходящий для твердых и хрупких материалов, но с повышенным риском термического повреждения и, возможно, требующий более длительной полировки для достижения высокого качества поверхности.

Сравнение глубокого шлифования с традиционными технологиями шлифования происходило, опираясь на данные, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Влияние абразива на параметры обработки

Параметр	Глубокое шлифование [8]	Традиционное шлифование [2]
Шероховатость (Ra)	от 15 до 25 нм	от 30 до 50 нм
Точность формы	± 1 мкм	± 5 мкм
Производительность	8 деталей/час	5 деталей/час

Исходя из данных, приведенных в табл. 2, следует сделать вывод: глубокое шлифование обеспечивает меньшую шероховатость, меньшее отклонение от формы, а также большую производительность в отличие от метода традиционного шлифования.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило эффективность глубокого шлифования с применением алмазных абразивов и высокоскоростных режимов обработки. Оптимизация технологических параметров позволяет достичь шероховатости Ra , равной 15 нм, и погрешности формы ± 1 мкм. Для дальнейшего развития технологии целесообразно интегрировать системы машинного обучения для адаптивной коррекции режимов обработки.

Так же выявлены ключевые факторы качества:

- использование алмазных абразивов снижает Ra на 20 % и глубину нарушенного слоя на 50 % по сравнению с корундом;
- высокая скорость вращения минимизирует микродефекты за счет равномерного распределения нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бобков А.В., Разработка технологии обработки металлических деталей для оптического приборостроения связанным алмазно-абразивным инструментом [Электронный ресурс] / Естественные и технические науки. 2007. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15860831> – Загл. с экрана.
2. Zebin Xia Advances in polishing of optical freeform surfaces / Zebin Xia, Fengzhou Fang, Eamonn Ahearne, Moran Tao – Journal of Materials Processing Tech, 2020. – 54 с.
3. Кондратенко В.С., Сакуненко Ю.И., Кобыш А.Н., Бурляй Д.А., Стыран В.В. Разработка оборудования и оснастки для изготовления алмазно-абразивных элементов на основе теплопроводных полимерных композитов// Сборник научных трудов МНТК ИВТ-2015. С. 79-81.
4. Theoretical modelling and analysis of the material removal characteristics in fluid jet polishing / Zhong-Chen Cao, Chi Fai Cheung // International Journal of Mechanical Sciences. – 2014. – С. 158 – 166.
5. Precision treatment of silicon wafer edge utilizing ultrasonically assisted polishing technique / N. Kobayashi, Y. Wu, M. Nomura, T. Sato // Journal of Materials Processing Tech, 2008. – С. 531-535.
6. Кондратенко В.С., Гиндин П.Д., Бурляй Д.А., Кобыш А.Н., Рогов А.Ю., Кондратенко Е.В., Сакуненко Ю.И., Бобков А.В. Новый алмазный инструмент для обработки оптических материалов // «Оптический журнал». Том 84. № 6. 2017. – С. 54-57.
7. Кондратенко В.С., Кобыш А.Н., Рогов А.Ю. Шлифовка и полировка по-новому//«Ритм». № 1. 2015. Москва. С. 34-40.
8. ОСТ 3-6043-86 Заготовки оптических деталей. Припуски на обработку глубоким шлифованием и глубоким полированием [Текст]: нац. стандарт РФ. – Введ. 01-01-1987. – Утвержден и введен в действие инструктивным письмом от 05.02.1986. – 9 с.
9. Канушина Л.А., *Обеспечение качества поверхностей оптических деталей путем регулирования теплового состояния зоны обработки при шлифовании алмазно-абразивным инструментом*: Канушина Л.А., Соснов А.Н., Соснова Н.К. Журнал Интерэкспо Гео-Сибирь, 2012.
10. Кондратенко В.С., Кобыш Н.И., Кобыш А.Н. Композиция для связанного полировального инструмента // Патент РФ № 2526982. 2013.

© Е. С. Мишечкин, М. П. Егоренко, Н. А. Гурин, 2025