

**Ключевые слова:**

оптические материалы, шлифование, квази-пластичность, ультрапрецизионное оборудование, шероховатость поверхности оптического класса

Keywords:

optical materials, grinding, quasi plasticity, ultra precising equipment, surface roughness of the optical grade

УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННАЯ АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ТОЛЩИН СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

**Евгений ЗАХАРЕВИЧ, Мария ШАВВА,
Василий ЛАПШИН, Сергей ГРУБЫЙ**

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по ультрапрецизионной обработке алмазным лезвийным монокристаллическим и абразивным инструментом хрупких материалов — дигидрофосфата калия, монокристаллического кварца, кварцевого стекла, ситалла, сапфира, германия. Приведены режимы обработки, при которых достигнута шероховатость обработанных поверхностей оптического класса.

The article presents the results of experimental studies on ultra precising processing of brittle materials (potassium dihydrogen phosphate, single crystal quartz, quartz glass, glass-ceramic, sapphire, germanium) with diamond blade single-crystal abrasive tools. It presents treatment regimens in which the roughness of optical grade of the machined surfaces is achieved.

Традиционная технология обработки поверхностей деталей из хрупких оптических материалов предусматривает предварительное шлифование алмазными кругами зернистостью различного гранулометрического состава в строгой последовательности от крупных до мелких фракций. Далее применяется окончательное химико-механическое полирование микропорошками (свободным абразивом). У этой технологии имеются существенные недостатки — относительно низкая производительность и стабильность процесса, сложность автоматизации и управления, влияние квалификации полировщика на качество обработки.

В ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и МГТУ имени Н.Э.Баумана в рамках Соглашения по Федеральной целевой программе проводят комплекс технологических исследований и конструкторских работ, направленных на повышение производительности, точности и качества обработ-

ки хрупких оптических материалов. Исследования основаны на положении о «квазипластичности» хрупких материалов. Квазипластичность — это проявление пластичных свойств в поверхностном слое хрупких материалов при определенных режимах обработки. При резании с нанометровыми толщинами срезаемого слоя контактное взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью создает условия, при которых происходит направленное квазипластичное удаление поверхностного слоя материала с формированием шероховатости в пределах нескольких нанометров и минимальным дефектным слоем.

Первая установка, специально созданная для исследования процессов при алмазном шлифовании в нанометровом диапазоне толщин, была спроектирована Yoshioko [1]. Далее исследования были продолжены Т. Bifano и Т. Dow в 80-х годах 20 века на установке «PEGASUS» [1]. В результате



Рис. 1. Специальный ультрапрецизионный станд для шлифования

проведенных экспериментов на большом количестве аморфных стекол, монокристаллов и керамических материалов авторами были установлены условия хрупко-пластичного перехода, при котором все материалы, независимо от их твердости и хрупкости, в процессе механической поверхностной обработки претерпевают переход от хрупкого режима разрушения к квазипластичному [2, 3, 4].

Алмазная обработка хрупких оптических материалов в режиме квазипластичного резания может быть реализована при наличии:

- ультрапрецизионного жесткого оборудования, обеспечивающего глубину резания в пределах 0,5–2 мкм, подачу заготовки в пределах 0,1–5 мкм/об, кинематику резания с толщиной



Рис. 2. Специальный ультрапрецизионный станд для фрезерования летучим резцом

срезаемого слоя от единиц до нескольких десятков нанометров;

- монокристаллических алмазных резцов с радиусом округления режущей кромки 30–50 нм;
- алмазных кругов на металлической или керамической связке, зернистость алмазоносного слоя которых составляет 1–5 мкм.

В рамках данной работы экспериментальные исследования были проведены на специальных ультрапрецизионных экспериментальных стандах для шлифования и фрезерования летучим резцом (рис. 1 и 2). Параметры стандов приведены в табл. 1 и 2.

Объектами исследований при алмазном шлифовании и фрезеровании были заготовки из хрупких оптических материалов: монокристаллического дигидрофосфата калия (KDP), монокристалличе-

Таблица 1. Параметры ультрапрецизионного станда для шлифования

№ п/п	Наименование параметров	Величина параметров
1.	Диапазон частот вращения шлифовального круга, мин ⁻¹	200–6000
2.	Диапазон частот вращения поворотного стола, мин ⁻¹	0,01–300
3.	Ход продольного суппорта, ось Z (суппорт врезания), мм	100
4.	Ход поперечного суппорта, ось X, мм	150
5.	Ход вертикального суппорта (установка круга по высоте), ось Y, мм	100
6.	Ход поворотного стола (установочное движение), ось B, угл. град.	20
7.	Количество осей, шт.: ось X — поперечный суппорт; ось Z — продольный суппорт (суппорт врезания); ось B — поворотный стол; ось S — вращение шлифовального круга	4
8.	Рабочая подача продольного суппорта, мм/мин	5–200
9.	Дискретность перемещения поперечного суппорта, мкм	0,1
10.	Дискретность перемещения продольного суппорта, мкм	0,1
11.	Точность позиционирования осей Z и X на длине 100 мм, мкм	0,5
12.	Точность позиционирования поворотной оси «B», угл. с	1
13.	Мощность электродвигателя шлифовального круга, кВт	1

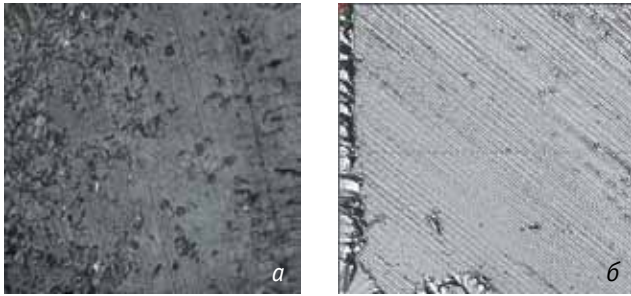


Рис. 3. Вид поверхностей заготовок из хрупких материалов, обработанных методом ультрапрецизионного алмазного шлифования (масштаб 400:1):
а — монокристаллический кварц;
б — кварцевое стекло

ского кварца, кварцевого стекла, ситалла, монокристаллического германия и сапфира.

Обработка заготовок при алмазном шлифовании осуществлялась на следующих режимах: глубина резания — 1 мкм, частота вращения шлифовального круга — 2000 об/мин. Образец был закреплен на поворотном столе диаметром 300 мм, который вращался с частотой от 0,01 до 0,07 об/мин. Обработка проводилась алмазным шлифовальным кругом диаметром 80 мм с зернистостью 1–3 мкм и концентрацией алмазных зерен равной 100% на керамической связке, без применения СОЖ.

Для контроля шероховатости обработанных поверхностей использовалась система NanoFocus® μSurf®. Система работает по принципу конфокального измерения с источником белого света и предназначена для контроля качества поверхностей с шероховатостью до 1 нм. Проводилось трехкратное измерение шероховатости поверхности. В табл. 3 приведены режимы обработки, максимальная толщина срезаемого слоя для алмазного круга, а также результаты измерений по шероховатости обработанной поверхности.

На рис. 3, *а* приведена обработанная поверхность монокристаллического кварца. Из рисунка видно, что при обработке материал находился в пограничном состоянии, то есть в состоянии хрупко-пластичного перехода. Об этом можно судить по одновременному наличию сколов на обработанной поверхности и по наличию «следов подачи» режущего инструмента. «Следы подачи» — следы обработки в квазипластичном режиме на обрабатываемой поверхности, которые совпадают с траекторией движения режущего инструмента [5, 6]. Поскольку материал в зоне резания находился в пограничном состоянии, то шероховатость обработанной поверхности имеет относительно большое значение — 34 нм. Можно предположить, что толщина срезаемого слоя — 8,9 нм — не обеспе-

Таблица 2. Параметры ультрапрецизионного станда для алмазного фрезерования

№ п/п	Наименование параметров	Величина параметров
1.	Диапазон частот вращения шпинделя, мин ⁻¹	50–3 000
2.	Ход продольного суппорта, ось Z (суппорт врезания), мм	100
3.	Ход поперечного суппорта, ось X, мм	200
4.	Количество осей, шт.: ось X — поперечный суппорт; ось Z — продольный суппорт(суппорт врезания); ось S — вращение шлифовального круга	3
5.	Рабочая подача продольного суппорта, мм/мин	5–200
6.	Дискретность перемещения поперечного суппорта, мкм	0,1
7.	Дискретность перемещения продольного суппорта, мкм	0,1
8.	Точность позиционирования осей Z и X на длине 100 мм, мкм	0,5
9.	Мощность электродвигателя шлифовального круга, кВт	1

Таблица 3. Режимы алмазного шлифования хрупких оптических материалов

Обрабатываемый материал	Скорость вращения поворотного стола, об/мин	Подача заготовки на оборот шлифовального круга, мкм/об	Максимальная толщина среза, нм	Шероховатость обработанной поверхности*, Ra, нм
Монокристаллический кварц	0,02	9,4	8,9	34
Кварцевое стекло	0,05	24	22,6	6
Ситалл	0,07	33	31	3
	0,05	24	22,6	3
	0,03	14,1	13,3	3
	0,01	4,7	4,1	3
Сапфир	0,07	33	31	1
	0,05	24	22,6	2
	0,03	14,1	13,3	2

*Примечание: поверхность с шероховатостью менее 10 нм относится к оптическому классу.

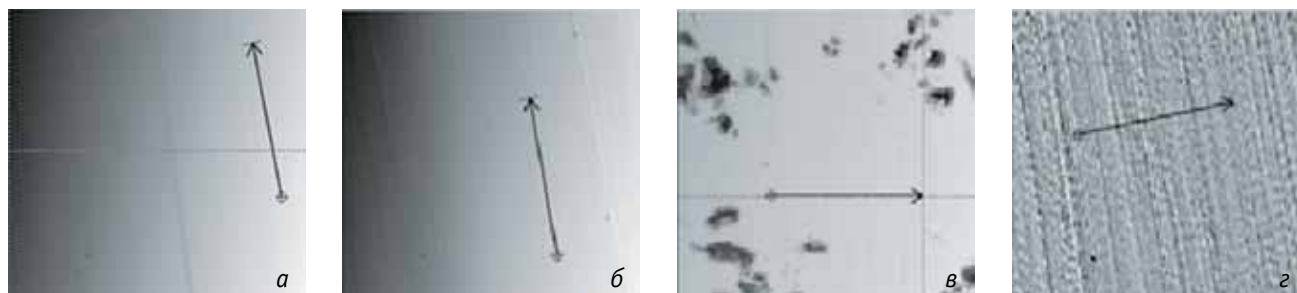


Рис. 4. Обработанная поверхность ситалла при продольной подаче (масштаб 250:1):
а — 33 мкм/об; б — 24 мкм/об; в — 14,1 мкм/об; з — 4,7 мкм/об

чивает полный переход материала в состояние квазипластичности.

На рис. 3, б приведена обработанная поверхность кварцевого стекла. На этой поверхности практически отсутствуют сколы и трещины, преобладают следы подачи. Обработка поверхности происходит в режиме квазипластичного резания, шероховатость такой поверхности составила 6 нм.

Аналогичные результаты получены при алмазном шлифовании ситалла с подачей 4 мкм/об (толщина среза 4,1 нм, шероховатость $Ra = 3$ нм) (рис. 4, з).

По результатам ультрапрецизионного алмазного шлифования различных хрупких материалов шероховатость обработанной поверхности составила от 1 до 34 нм. При шлифовании в режиме квазипластичного резания шероховатость обработанной поверхности кварцевого стекла, ситалла и сапфира не превышает 6 нм, то есть относится к оптическому классу.

Обработка заготовок монокристаллов дигидрофосфата калия и германия алмазным монокристаллическим инструментом в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя осуществлялась на специальном ультрапрецизионном стенде по схеме фрезерования однорезцовой головкой. Параметры алмазного резца, установленного в головку, режимы фрезерования и значения шероховатости обработанной поверхности приведены в табл. 4. Диаметр однорезцовой головки составляет 35 мм.

Все эксперименты проведены на частоте вращения шпинделя 1000 об/мин.

На рис. 5 показаны фотографии поверхностей хрупких материалов, обработанных однорезцовой алмазной фрезерной головкой при различных значениях толщины срезаемого слоя.

Как следует из рис. 5, при уменьшении толщины срезаемого слоя на обработанной поверхности четко прослеживаются «следы подачи» режущего инструмента, то есть поверхностный слой переходит в состояние квазипластичности [7]. С уменьшением толщины срезаемого слоя снижается шероховатость обработанной поверхности. Элементы оптики и микроэлектроники из дигидрофосфата калия и германия могут быть обработаны алмазным монокристаллическим инструментом с шероховатостью оптического класса [8, 9, 10, 11].

При ультрапрецизионной алмазной обработке хрупких материалов в нанометровом диапазоне толщин среза образуется стружка переменной нанометровой толщины. Внешний вид стружки показан на рис. 6.

При алмазном шлифовании такая стружка накапливается в межзеренном пространстве алмазосодержащего слоя, что приводит к «засаливанию» круга. Избежать засаливания поверхности круга можно путем применения правки. Правка алмазных шлифовальных кругов, зернистость которых составляет менее 5 мкм, не может быть осуществлена механическим методом по причине шаржирования алмазо-

Таблица 4. Режимы алмазного фрезерования хрупких оптических материалов

Обрабатываемый материал	Радиус алмазного резца при вершине, мм	Радиус округления режущей кромки, нм	Передний угол, град.	Задний угол, град.	Глубина резания, мкм	Толщина срезаемого слоя, нм	Количество проходов	Ra , мкм
Дигидрофосфат калия KDP	2	50	0	-7	1	77,4	3	12
	2					31,3	8	16
	2					5,6	3	3
Германий	3,6					5,6	3	1

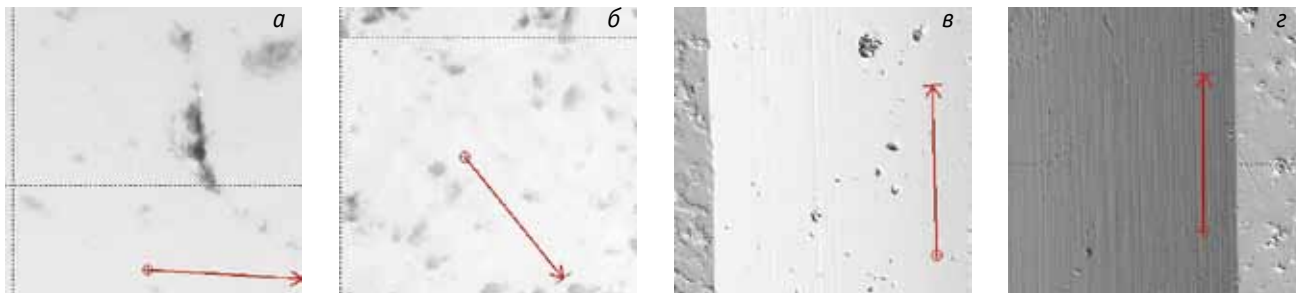


Рис. 5. Поверхности образцов после алмазного фрезерования при различной толщине срезаемого слоя (масштаб 250:1):
 а — KDP, 77,4 нм; б — KDP, 31,3 нм; в — KDP, 5,6 нм; з — германий, 5,6 нм

носного слоя частицами правильного инструмента. Поскольку правка шлифовального круга вне станка сказывается на точности обрабатываемой поверхности, а также снижает производительность обработки, рекомендовано использовать непрерывную электрохимическую правку (ECD-правка) [12, 13].

По результатам конструкторских проработок смоделирована, разработана и изготовлена установка, обеспечивающая непрерывную электрохимическую правку алмазного круга непосредственно при ультрапрецизионном алмазном шлифовании заготовок из хрупких материалов.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что при режимах резания, обеспечивающих нанометровые значения срезаемого слоя, поверхностный слой хрупкого материала переходит в состояние «квазипластичности», образуется поверхность без сколов и трещин, с шероховатостью в пределах нескольких нанометров. Метод алмазного шлифования обеспечивает меньшую толщину срезаемого слоя, чем алмазное фрезерование летучим резцом, поэтому он предпочтителен для обработки хрупких материалов более высокой твердости. В случае обработки хрупких материалов меньшей твердости, можно использовать метод алмазного фрезерования летучим резцом.

Для получения требуемого качества поверхностей из хрупких материалов (шероховатость $R_a = 1$ нм, минимальная погрешность обработки —

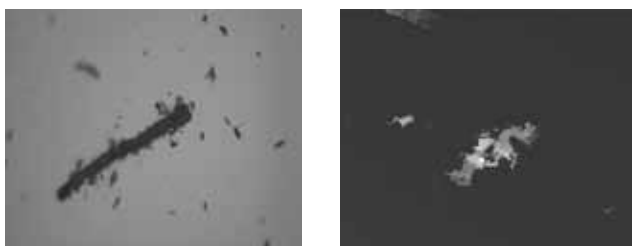


Рис. 6. Стружка при алмазной ультрапрецизионной лезвийной обработке дигидрофосфата калия (масштаб 30:1)

10 нм на площади 100×100 мм, минимальный размер трещиноватого слоя) необходимо повысить жесткость и точность используемого оборудования. В рамках дальнейших исследований планируется создание специального ультрапрецизионного стенда для наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания с узлами на аэростатических опорах повышенной жесткости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bifano T. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials / Т. Bifano, Т. Dow, R. Scattergood // Transaction of ASME. 1991. Vol. 113. № 5. P. 184–189.
2. Теплова Т.Б. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности // Научный вестник МГГУ. 2010. № 8. С. 73–88.
3. Nazwa T. Precision surface grinding of silicon carbide with fine grain diamond cup wheel / Т. Nazwa // Engineering e-Transaction. 2010. Vol. 5. № 1. P. 19–26.
4. Шейнман Е. Пластичное резание хрупких материалов в нанодиапазоне. Обзор зарубежных исследований / Е. Шейнман // ИТО. 2007. № 12. С. 54–56.
5. Шавва М.А. Расчет сил резания при алмазном шлифовании хрупких материалов / М.А. Шавва, С.В. Грубый // Сб. тр. международной науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы современного машиностроения». — Юрга. 11–12 декабря 2014.
6. Шавва М.А. Расчет сил при алмазном шлифовании хрупких материалов / М.А. Шавва // Сб. Всеросс. межвузов. науч.-техн. конф. «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий». — Уфа. 3–5 марта 2015.

7. *Shariff Udin M.* Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon/ Shariff Udin M., Seah K.H.W., Li X.P., Rahman M., Liu K. — Elsevier. 2004.
8. *Wang J.* An experimental study of cutting performance on monocrystalline germanium after ion implantation/ J. Wang, F. Fang, X. Zhang// Precision Engineering. 2015. № 39.
9. *Грубый С.В.* Моделирование процесса и разработка технологии сверхточной обработки плоских отражателей однорезцовой алмазной фрезерной головкой/ С.В. Грубый, В.В. Лапшин// Электронное научно-техническое издание: Наука и образование. 2014. № 2.
10. *Rhorer L.* Fabrication of optics by diamond turning/ J. Evans, L. Rhorer// Handbook of Optics, 3rd Edition, Chapter 41. 2010. Vol. 2.
11. *Chen H.* Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals// H. Chen, Yifan Dai, Ziwen Zheng// Machining Science and Technology: An International Journal. 2011. P. 231–242.
12. *Шавва М.А.* Экспериментальная установка для алмазного шлифования с применением непрерывной электрохимической правки шлифовального круга / М.А. Шавва, Е.М. Захаревич // Электронное научно-техническое издание: Наука и образование. 2014. № 3.
13. *Zhao Q.* Ultra-precision grinding of optical glasses using mono-layer nickel electroplated coarse-grained

diamond wheels. Part 1: ELID assisted precision conditioning of grinding wheels/ Q. Zhao, B. Guo// Precision Engineering. 2015. № 39.

Евгений Мефодьевич ЗАХАРЕВИЧ —
заведующий отделом технологий
ультрапрецизионной обработки и оборудования,
ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»

Мария Александровна ШАВВА —
аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана,
инженер-конструктор ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»

Василий Владимирович ЛАПШИН —
аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана,
инженер-технолог ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»

Сергей Витальевич ГРУБЫЙ —
доктор технических наук,
профессор кафедры «Инструментальная техника
и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана

Примечание:

Статья выполнена в рамках Соглашения №14.579.21.0042 от 25.08.2014 (уникальный идентификатор RFMEFI57914X0042) между ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и Министерством образования и науки РФ по теме «Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания»