

12. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка // Автометрия.—1985.—№ 6.
13. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Объектив с дифракционным корректором для лазерного проигрывателя // Компьютерная оптика.—1990.—№ 7.

Поступила в редакцию 10 июля 1991 г.

УДК 681.7.023

Л. Л. Бурман, А. П. Денисенко, А. Н. Ершов, Э. Р. Павлов, В. И. Сидорко,
М. Ф. Сыроватский, З. И. Штейнгольц

(Киев — Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МИКРОТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ОПТИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ

Изложены результаты исследований процесса микроточения оптических деталей из кристаллов Si, Ge, CaF₂, BaF₂, LiNbO₃ и др. Определены основные параметры, влияющие на качество обработанной поверхности. Внедрение разработанных рекомендаций по процессу точения резцами из природных алмазов позволяет обеспечить шероховатость поверхностей кристаллов Si, Ge, CaF₂, BaF₂, LiF в диапазоне $R_z = 0,032 \div 0,050$ мкм. Исследован характер износа резцов в зависимости от пути точения. Изучено влияние вибрации системы на показатели шероховатости обработанной поверхности. Основные выводы по работе заключаются в том, что оптические детали из кристаллов после процесса микроточения могут без последующей их полировки эффективно работать в системах ИК-техники.

В настоящее время в отечественной технологии механической обработки оптических кристаллов типа Si, Ge, CaF₂, BaF₂, LiF, LiNbO₃, ZnSe, CdSb и других используются только методы шлифования и полирования инструментами со связанным и свободным абразивами.

Несмотря на свою кажущуюся простоту, процесс абразивной обработки относится к сложному классу пограничных явлений. Сложность этого процесса объясняется тем, что форма поверхности инструмента, к которой притирается изделие, нестабильна во времени, в результате чего метод не является воспроизводимым. Процесс шлифования и полирования — многостадийный процесс, трудоемкий и энергоемкий. Управлять им исключительно трудно. И хотя эти процессы не требуют дорогостоящего высокоточного оборудования, обработка поверхностей современных оптических деталей является весьма длительной и зависит от большого числа факторов, в том числе от квалификации оператора.

Исследуемый нами процесс прецизионной лезвийной обработки — алмазного микроточения оптических кристаллов на станках особо высокой точности резцами из природных алмазов и синтетических сверхтвердых материалов — позволяет исключить указанные недостатки [1]. Метод алмазного микроточения базируется на широкоизвестных принципах. Полученные при точной механической обработке поверхности будут точной копией поверхности вращения, которая получается сочетанием формы обрабатывающего инструмента и траектории его движения. Основным преимуществом метода по сравнению с процессами шлифования и полирования является возможность им управлять.

Цель настоящего исследования — изучение качества плоских поверхностей деталей из оптических кристаллов, обработанных методом алмазного микроточения, и определение областей применения данного метода, обусловленных их оптическими свойствами.

При прецизионном алмазном точении оптических кристаллов точность и качество поверхности в основном определяются следующими факторами [2]:

1) результирующим следом режущего инструмента на обрабатываемой поверхности, являющимся спиральной линией, геометрические параметры которой определяют первую группу слагаемых шероховатости;

2) вибрациями режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности, которые образуют вторую группу слагаемых;

3) износом алмазного инструмента, потерей его работоспособности, определяющими третью группу слагаемых.

В процессе работы инструмента влияние перечисленных факторов сказывается одновременно, в результате чего образуется профиль поверхности, характеризующий точность и качество обработки.

Исследования по установлению факторов, влияющих на качество поверхности образцов, проводились на специальном прецизионном станке мод. МК 6502 при следующих режимах: частота вращения шпинделя изделия — 2800 мин^{-1} , глубина резания t — 10—60 мкм, скорость подачи V_f — 10—50 мм/мин, СОЖ — распыленный спирт технический ГОСТ 18300—72, обрабатываемые детали — заготовки диаметром 100 мм, толщиной 5—10 мм из кристаллических материалов (табл. 1).

Заготовка закреплялась в вакуумном патроне. Обработка осуществлялась при перемещении резца от периферии к центру детали, стружка удалялась путем инъекции из зоны резания.

Точение производилось на выбеге шпинделя, т. е. при выключенном во избежание вибрации приводе его вращения, который является основным источником вибраций.

В качестве инструмента использовались резцы из технических алмазов различного кристаллографического габитуса. Кристаллы алмаза в резце имели формы октаэдра, ромбододекаэдра, ромбододекаэдроида. Все кристаллы алмаза удлинены вдоль оси II порядка. Алмазы закреплялись в металлической подушке методом пайки медно-фосфорно-сурьмянистым припоем. Резцы имели следующие геометрические параметры: радиус r заточки резца 10 мм, величины углов: переднего (γ) 0, -5° ; заднего (α) -8° , длина зачистной фаски 0,5—0,7 мм.

При проведении исследований обрабатывались весьма дефицитные и дорогостоящие материалы, поэтому особое внимание обращено на выбор физико-механического параметра, определяющего обрабатываемость указанных материалов. Нами было установлено [3], что при прецизионном шлифовании оптических материалов алмазным инструментом такими параметрами могут являться коэффициенты относительной обрабатываемости $K_{об}$ и относительной шероховатости $K_{ш}$, коррелирующие с микротвердостью материалов H . Учитывая, что между царапанием (точением) материала и его шлифованием не только нет качественного различия, но при определенных

Т а б л и ц а 1
Физико-механические свойства исследуемых материалов

Материал	Микротвердость H , ГПа	Коэффициент трещиностойкости K , $\text{МН} \cdot \text{м}^{-3/2}$	Модуль упругости E , МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$
Si	9,0	0,70	174,0	0,262	2,328
Ge	8,0	0,50	141,0	0,252	5,330
BaF ₂	0,8	0,20	65,2	0,309	4,893
CaF ₂	1,6	0,25	108,9	0,290	3,180
LiF	1,0	0,10	121,4	0,188	2,640
LiNbO ₃	6,2	0,75	171,5	0,200	4,628
CdSb	2,0	0,20	—	—	—

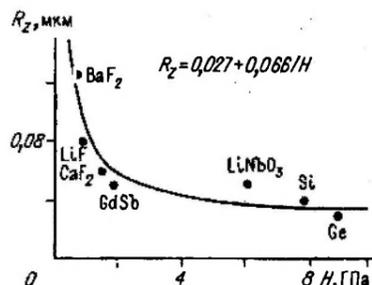


Рис. 1

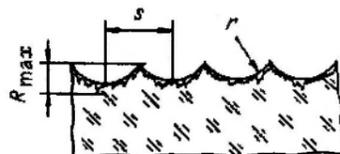


Рис. 2

условиях наблюдается качественное соответствие [4], нами в качестве критерия относительной шероховатости при микроточении оптических кристаллов принята величина микротвердости. В результате выполненных исследований установлено (рис. 1), что параметр шероховатости R_z обработанной алмазным микроточением поверхности связан с микротвердостью H соотношением $R_z = 0,027 + 0,066/H$ [мкм].

Анализ факторов, влияющих на качество обработанной поверхности кристаллов, основывался на изучении зависимости шероховатости поверхности (R_z , мкм) от глубины резания t и скорости подачи резца V_s , при этом особое внимание уделялось получению высококоррелированной бороздковой структуры на поверхности детали (рис. 2). Дело в том, что при точении деталей на выбеге шпинделя скорость вращения последнего постоянно уменьшается во времени. Таким образом, параметр s — подача на оборот, характеризующаяся расстоянием между соседними впадинами или выступами бороздок, постоянно изменяется. Это условие отрицательно влияет на частотно-контрастную характеристику оптических деталей.

Исследования, проведенные нами при точении заготовок CaF_2 (1) и Si (2), показали, что изменения величин t и V_s весьма незначительно влияют на падение скорости. Усредненная зависимость характера падения числа оборотов шпинделя n от времени T приведена на рис. 3: $n = 2724 \cdot 10^{-(1,0 \cdot 10^{-3})T}$ (кривая 1), $n = 2756 \cdot 10^{-(1,25 \cdot 10^{-3})T}$ (2), $V_s = 29 \cdot 10^{-(1,6 \cdot 10^{-3})T}$ (4).

При постоянном значении скорости подачи V_s и уменьшающейся скорости вращения шпинделя величина s будет постоянно изменяться (см. рис. 3, кривая 3). С целью обеспечения постоянной величины s необходимо по мере падения скорости n уменьшать величину V_s в соответствии с полученной нами зависимостью $V_s = f(T)$ (см. рис. 3, кривая 4).

Учитывая, что станки, выпускаемые в СССР, имеют постоянную скорость вращения шпинделя, и при условии обработки детали на выбеге шпинделя необходимо предусмотреть при модернизации конструкции станка возможность изменения скорости подачи резца в зависимости от скорости вращения детали или стабилизировать последнюю.

Зависимость шероховатости обработанной поверхности: a — для кристаллов Si (1), CaF_2 (2) и BaF_2 (3) от глубины резания t , b — для кристалла Si от скорости горизонтальной подачи V_s — приведена на рис. 4. Проведенные исследования показали, что оптимальными с точки зрения обеспечения минимальной величины шероховатости обработанной поверхности режимами являются:

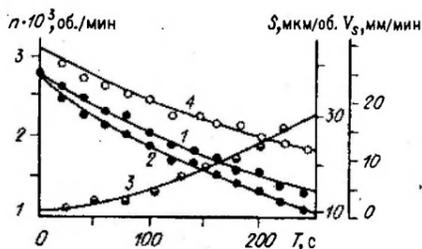


Рис. 3

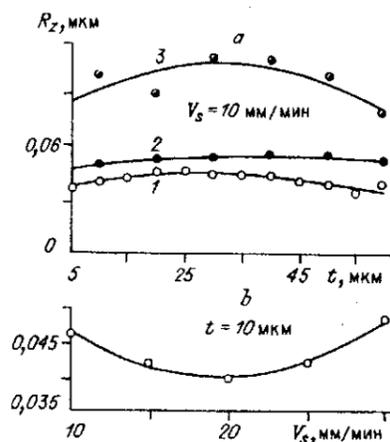


Рис. 4

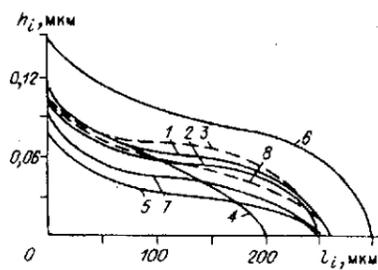


Рис. 6

Анализ характера опорных кривых [5], которые характеризуют распределение материала по высоте рельефного слоя, подтверждает, что в диапазоне глубин точения $t = 10-50$ мкм качество обработанной поверхности не изменяется (рис. 6, где 1 — $\Delta h = 10$; 2 — 22; 3 — 32; 4 — 36; 5 — 42; 6 — 48; 7 — 55; 8 — 56 мкм).

При обработке кристаллов BaF_2 был установлен аналогичный характер зависимости шероховатости от различных технологических факторов (см. рис. 4), однако достигнуть качества обработки, соответствующего полированной поверхности, нам не удалось.

Вторую группу слагаемых шероховатости поверхности составляют следы вибраций резца как результат его периодического движения относительно обрабатываемой детали вдоль оси шпинделя. Частота вибрации резца обычно отличается от частоты основной гармоники, определяемой величиной подачи на оборот. Однако если вибрации резца гармонически связаны с частотой вращения шпинделя, то в результате может периодически изменяться глубина бороздки на поверхности (см. рис. 2).

Исследование вибраций резца проводилось при сопоставлении частот дискретных составляющих измеренного спектра вибраций с существующими частотами возбуждения в диапазоне от 5 до 100 Гц, так как вибрации этой частоты в наибольшей степени влияют на шероховатость обработанной поверхности [6]. Для исследований применялся виброизмерительный комплекс, в комплект которого входят усилитель, измерительное устройство и анализатор спектра. В качестве датчиков применялись вибропреобразователи KD-35.

В табл. 2 приведены величины амплитуд вибраций резца при выключенном станке без процесса резания в области низких частот. Исследование вибраций резца в процессе резания при микроточении кремния со скоростью

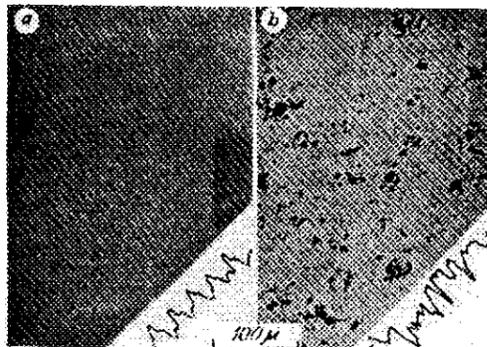


Рис. 5

$n = 2000-2800 \text{ мин}^{-1}$, $t = 10-40$ мкм, $V_s = 10-35$ мм/мин.

При данных режимах осуществляется пластическое удаление материала с обрабатываемой поверхности (рис. 5, а, увеличение для профилограммы — $400\times$). Шероховатость обработанной поверхности составляет $R_z = 0,032-0,050$ мкм.

Дальнейшее увеличение глубины резания или величины скорости подачи приводит к изменению характера разрушения. Появляются элементы, характеризующие процесс хрупкого разрушения, что вызывает резкое ухудшение качества поверхности (рис. 5, б, увеличение для профилограммы — $10000\times$).

Анализ характера опорных кривых [5], которые характеризуют распре-

Т а б л и ц а 2

Режим работы станка	Амплитуда, мкм					
	Частота, Гц					
	6—12	12—16	16—25	25—31	31—50	> 50
Станок выключен	0,020	0,020	0,027	0,010—0,015	0,010	< 0,010
В пневмосистему подан воздух (работают виброопоры)	0,0215	0,029	0,024	0,009	0,010	< 0,010
Включено вращение шпинделя	0,048	0,060	0,024	0,059	0,031	< 0,010

подачи резца 5—15 мм/мин, $\gamma = 0^\circ$ и различных глубинах резания показывает, что амплитуда вибраций в процессе резания может увеличиваться в 2—10 раз (рис. 7). Причинами вибраций резца в основном являются: изменения физико-механических свойств обрабатываемого материала (различные включения, блоки кристалла и т. п.) по поверхности обрабатываемой детали; переменная толщина среза, обусловленная бороздковой структурой предварительно обработанной поверхности; износ резца, а также другие случаи возникновения переменной составляющей силы резания, величина которой зависит, например, от формы заточки резца и режимов резания. По результатам, представленным на рис. 7, можно сделать вывод о существенном влиянии скорости подачи на амплитуду вибраций резца. Снижение амплитуды вибраций резца при изменении скорости подачи, в свою очередь, обуславливает уменьшение высоты микронеровностей на обрабатываемой поверхности (см. рис. 4, б).

Износ резца оказывает существенное влияние не только на качество обработанной поверхности, но и на точность ее формы. Изменение характера и величины износа алмазных резцов с увеличением пути точения при обработке оптических кристаллов Si (а) и CaF₂ (б) приведено на рис. 8. При приблизительно одинаковой величине износа характер последнего различен и зависит от свойств обрабатываемого материала.

Изменение поверхности износа с увеличением пути резания позволяет предположить, что износ происходит как следствие двух последовательных различных процессов. Первый из них характеризуется полированием плоскостей износа, в результате чего образуется гладкая режущая грань без насечек, образованных при заточке, и других дефектов. Режущая кромка в таком состоянии находится в течение 20—30 км пробега. В этих условиях обеспечивается наилучшее качество обработанной поверхности.

Затем в результате разрушения микронеровностей на площадках износа происходит интенсивное увеличение его объема, процесс износа замедляется, сопровождаясь накоплением повреждений (микросколов, микротрещин и т. п.). В диапазоне 70—100 км развивается начальный износ, а в диапазоне 130—150 км существует область неустойчивости, которая предшествует разрушению резца.

Следует отметить существенное влияние кристаллографической ориентации алмаза в резце на скорость его износа, так как процесс износа различных резцов развивался по-разному.

Установлено, что поверхность алмаза частично имеет следы скоростного эрозионного воздействия на

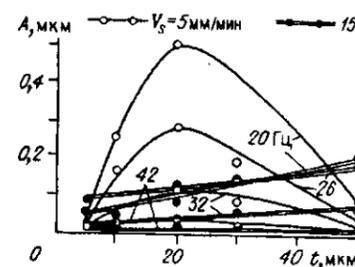


Рис. 7

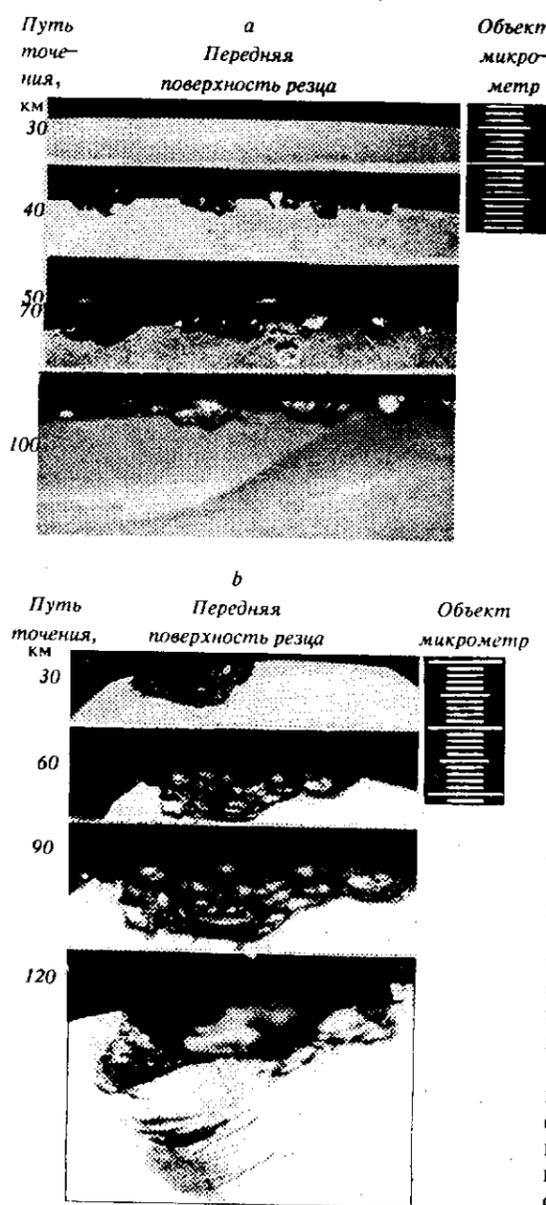


Рис. 8

ботанная этим методом, может быть использована в приборах, работающих в ИК-области спектра, без снижения их качества по сравнению с оптическими элементами, изготовленными традиционными методами. Получены также положительные результаты в применении алмазного микроточения при обработке деталей, работающих в видимой области спектра.

Т а б л и ц а 3

Коэффициент трения пары алмаз — обрабатываемый материал	
Исследуемый материал	Значение коэффициента трения
Силикатное стекло	0,10—0,18

нее шлама, т. е. микроступени. Не исключено нарушение поверхности резца отколовшимися частицами алмаза, которые могут внедряться и закрепляться в обрабатываемой поверхности, а затем при соприкосновении с резцом образуют выколки. Все это приводит к резкому увеличению скорости износа, разрушению режущей кромки, отколу части резца и выходу его из строя (см. рис. 8). Шероховатость обработанной таким резцом поверхности резко ухудшается.

Указанный механизм в значительной степени зависит от кристаллографической ориентации режущей части резца и коэффициента трения на поверхности износа.

В табл. 3 приведены коэффициенты трения алмаза — материала, полученные при исследовании на склерометрической установке.

Результаты проведенных нами исследований позволяют сделать вывод о безусловной перспективности применения процесса микроточения при обработке оптических деталей, особенно сферических и асферических. Оптика, обра-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмазная обработка оптических элементов: прошлое, настоящее и многообещающее будущее / ВЦП.—№ КР-72873.—Киев, 27.05.88.—Пер. ст. Saito T. T. из журн.: Opt. Eng.—1978.—17, N 6.—Р. 570.
2. Перспективы прецизионной механической обработки, полировки и требований к оптике / ВЦП.—№ КР-72878.—Киев, 05.05.88.—Пер. ст. Sagner G. M. из журн.: Proc. Internat. Soc. Opt. Eng.—1982.—306.—Р. 90.
3. Рогов В. В., Бурман Л. Л. Обрабатываемость хрупких неметаллических материалов // Алмазы и сверхтвердые материалы.—1980.—№ 3.
4. Кузнецов В. Д. Физика резания и трения металлов и кристаллов // Избр. тр.—М.: Наука, 1977.
5. Крагельский И. В., Добычин М. И., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ.—М.: Машиностроение, 1977.
6. Характеристика поверхности оптики после механической обработки / ВЦП.—№ КР-74035.—Киев, 22.06.88.—Пер. ст. Stover J. C. из журн.: Proc. Soc. Photo-optical Instrum. Eng.—1976.—93.—Р. 89.

Поступила в редакцию 30 сентября 1991 г.

УДК 621.315.592 : 772.99

В. П. Коронкевич, И. Г. Пальчикова

(Новосибирск)

СОВРЕМЕННЫЕ ЗОННЫЕ ПЛАСТИНКИ

Приведено единое представление функций пропускания зонных пластинок в виде рядов, позволяющее легко анализировать их оптические характеристики. Рассчитана дифракционная структура зонной пластинки при произвольном расположении точечного источника. Показано, что возможно целенаправленно управлять распределением энергии в каустике или осуществлять безаберрационные проективные преобразования изображений при помощи зонных пластинок и их комбинаций, что значительно расширяет область применения.

Введение. Зонные пластинки, состоящие из чередующихся прозрачных и непрозрачных колец, введены в оптику О. Френелем в начале прошлого века. Являясь прекрасным инструментом для демонстрации дифракции и интерференции света, они не получили практического распространения вплоть до 80-х годов из-за технологических трудностей изготовления и тиражирования. По своему действию на световую волну зонные пластинки подобны классическим рефракционным элементам и аналогично последним позволяют разделять, отклонять, фокусировать, расширять и рекомбинировать световые пучки. Со времен Дж. Фраунгофера основные применения дифракционных элементов ограничивались спектроскопией. Развитие современных фототехнологий и компьютерного синтеза дифракционных элементов дает возможность значительно снизить трудности их изготовления и тиражирования [1]. Следует ожидать, что классическая элементная база, включающая линзы, призмы, зеркала и их комбинации, будет существенно дополнена новыми компонентами.

В оптических системах массового спроса, таких, как лазерные проигрыватели [2], принтеры [3], кассовые аппараты, фотоплоттеры и лазерные технологические установки [4], стали широко применять зонные пластинки и их модификации. В 1986 г. зонные пластинки были встроены более чем в 80 тысяч лазерных проигрывателей [5]. Это, по-видимому, первое крупномасштабное использование дифракционных элементов в практике оптического приборостроения.

Аналогичное по масштабу применение дифракционных элементов проектируется в области межсоединений при разработке оптических шин данных