

Ультрапрецизионная обработка хрупких оптических материалов

Боровский Г. В., Шавва М. А., Захаревич Е. М., ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ»,
Грубый С. В., МГТУ им. Н. Э. Баумана, Маслов А. Р., МГТУ СТАНКИН

Современная промышленность все чаще нуждается в технологиях, позволяющих обрабатывать хрупкие материалы, в число которых входят и кристаллы, с оптическим качеством поверхности. Зачастую показатели, отвечающие за качество обработанных деталей, должны быть на порядок выше заявленных, однако отсутствие методов обработки и оборудования необходимого класса точности приводит к тому, что производитель вынужден довольствоваться той шероховатостью и точностью формы деталей, которые могут быть обеспечены традиционными методами обработки.

На данный момент хрупкие материалы обрабатываются при помощи шлифования и полирования. Этот трудоемкий процесс осуществляется в несколько стадий и может занимать от нескольких дней до нескольких недель. Как правило, обработка ведется в следующей последовательности: поверхность обрабатываемой детали шлифуется абразивными кругами с постепенным снижением зернистости, а далее деталь дорабатывается полированием в агрессивной среде. Таким образом, обработка поверхности детали совмещает в себе обработку связным и свободным абразивом. Несмотря на то, что описанный выше метод используется на протяжении долгого периода времени и показал себя достаточно эффективным, все же он имеет некоторые недостатки:

- Полировальник прижимается к обрабатываемой детали с

определенным усилием, что приводит к выкалыванию частиц обрабатываемого материала и образованию трещин на обрабатываемой поверхности. Последующая обработка только увеличивает скорость распространения трещин и вызывает в итоге лавинообразное образование трещиноватого (поврежденного) слоя;

- Из-за довольно тесного взаимодействия абразивного и обрабатываемого материалов велика вероятность шаржирования обработанной поверхности, что приводит к визуальным дефектам. Эта проблема особо остро стоит для поверхностей оптических деталей;
- Традиционная схема обработки неспособна обеспечить шероховатость поверхности менее 20 нм и точность формы менее 200 нм. Эти максимально достижимые показатели качества поверхности идут вразрез с современными требованиями;
- Традиционная схема обработки обладает низкой производительностью. Проблема производительности особо остро стоит для крупногабаритных деталей;
- Традиционную схему трудно адаптировать для деталей произвольных (асферических) форм;
- Применение химических сред при полировании деталей необходимо, однако при этом страдает не только окружающая среда, но и наносится вред здоровью персонала.

Указанные недостатки критичны при современном мировом уровне качества деталей оптической и электронной промышленности. Необходимо создать качественно новый подход к обработке хрупких материалов, который потребует современного, более точного оборудования.

Заменой традиционного метода обработки может служить обработка в квазипластичном режиме. Основой этого метода является способность обрабатываемого материала при определенных условиях в зоне менять свои свойства. Таким образом, хрупкие материалы при специально созданном в зоне резания высоком давлении ведут себя как пластичные и могут быть обработаны с показателями качества, которые достижимы только при обработке металлов и их сплавов.

Так, при обработке кварцевого стекла, кристаллов соли типа KDP, германия резание в квазипластичном режиме позволяет достигнуть шероховатости поверхности не более 1 нм и точности формы не более 10 нм. Метод позволяет обрабатывать как плоские поверхности, так и поверхности произвольной (асферической) формы.

Квазипластичный режим резания обеспечивается целым рядом факторов. В их число помимо необходимой критической толщины срезаемой стружки, обеспечиваемой режимными параметрами процесса (подачей и глубиной резания) и геометрическими параметрами режущего инструмента, входят также технические характеристики оборудования [1, 2].

Для квазипластичного режима обработки необходимо обеспечить:

- Толщину срезаемой стружки обрабатываемого материала ниже критической, т. е. в пределах 10...100 нм (в зависимос-

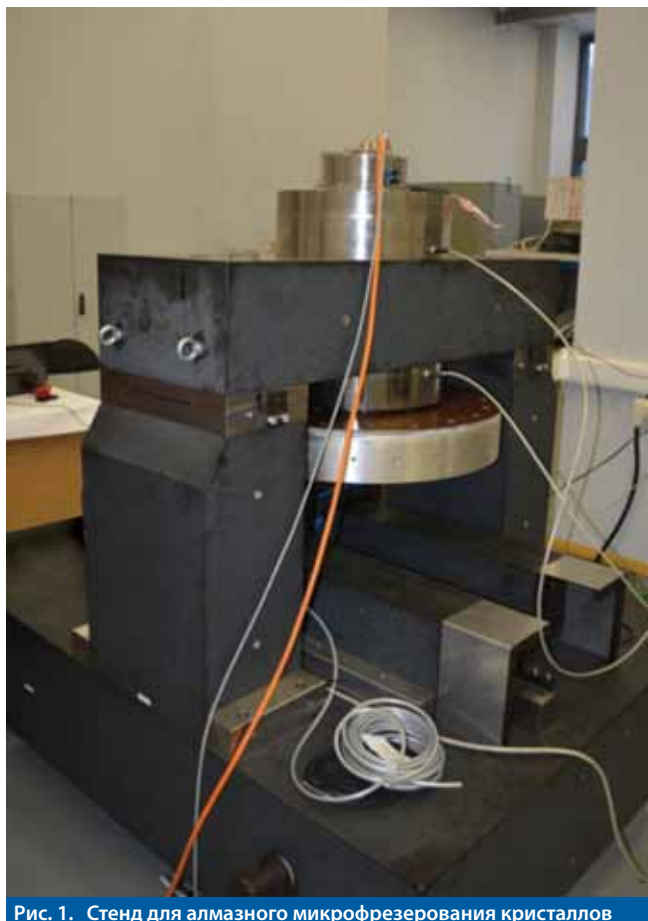


Рис. 1. Стенд для алмазного микрофрезерования кристаллов

ти от свойств обрабатываемого материала). При этой толщине стружка обрабатываемого материала переходит в другое состояние (стружка скола переходит в сливную стружку), что является основным признаком изменения поведения обрабатываемого материала [2, 3, 4];

- Режимные параметры процесса, а именно подачу и глубину резания, в пределах от нескольких нм до 1... 2 мкм (в зависимости от свойств обрабатываемого материала). В случае, если значения режимных параметров не соответствуют установленному уровню, достижение критической толщины стружки невозможно, следовательно, обрабатываемый хрупкий материал не переходит в пластичное состояние;

- Геометрические параметры режущего инструмента. В частности, для возникновения высокого давления в зоне резания передний угол режущего инструмента должен быть отрицательным (конкретное значение величины угла определяется экспериментально), а для обеспечения необходимой толщины срезаемой стружки необходимо, чтобы радиус при вершине инструмента был достаточно большим (0.1...2 мм), а радиус округления режущей кромки составлял 20...800 нм. Такие параметры можно обеспечить только на алмазном монокристаллическом инструменте;

- Жесткость станочной системы. Поскольку обеспечение режимных параметров связано не только с показателями дискретности перемещений узлов станка, но и с упругим отжатием режущего инструмента, жесткость станочной системы является одним из решающих факторов.

Таким образом, для квазипластичного режима обработки необходим специальный алмазный монокристаллический инструмент и оборудование повышенной жесткости.

Основные преимущества данного метода:

- Возможность обработки хрупких материалов (оптических стекол, германия, кристаллов KDP) с достижением значения шероховатости не более 1 нм и отклонения формы не более 10 нм;

- Возможность обработки деталей любой произвольной формы, в том числе асферической;

- Возможность уменьшения трещиноватого слоя на обработанных поверхностях. Значительное уменьшение трещиноватого слоя или его отсутствие особо важно для деталей, используемых в электронной промышленности;

- Процесс обработки в квазипластичном режиме значительно более производителен по сравнению с традиционной технологией обработки, поскольку требуемые показатели качества достигаются посредством только одного вида обработки, длительность операции зависит только от наследственных качеств заготовки [5, 6];

- Метод квазипластичной обработки является экологически чистым.

В ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» последние несколько лет проводятся комплексные исследования по разработке и созданию ультрапрецизионного оборудования для обработки широкой номенклатуры материалов. В их число входят: закаленные стали, твердые сплавы, цветные сплавы, а также хрупкие оптические материалы.

Основные принципы, реализуемые ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» при создании ультрапрецизионного оборудования:

- Использование аэростатических направляющих и опор с пористым дросселированием и вакуумным натягом;
- Использование системы виброизоляции с собственной частотой колебаний не более 5 Гц;
- Использование электроприводов прямого действия на



Рис. 2. Стенд для сверхточного алмазного точения сферических и асферических поверхностей

базе встроенных маловиброактивных безжелезных двигателей в комплекте с датчиками обратной связи нанометрового разрешения.

Для обработки плоских поверхностей хрупких кристаллов группы KDP методом алмазного фрезерования был создан специальный ультрапрецизионный экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.

Как и было сказано выше, стенд предназначен для алмазного микрофрезерования кристаллов группы KDP с шероховатостью поверхности не более 10 нм и точностью поверхности не менее 50 нм на обрабатываемой поверхности размерами 100×100 мм.

Основные параметры стенда для алмазного микрофрезерования приведены в таблице 1.

Параметры ультрапрецизионного стенда для алмазного микрофрезерования кристаллов группы KDP		
Таблица 1		
№п/п	Параметр станка	Значение параметра
1.	Число координатных осей: Ось X – движение продольного суппорта; Ось C – движение шпиндельного узла.	2
2.	Наибольшее перемещение продольного суппорта (передвижение заготовки), ось X, мм	800
3.	Диапазон частот вращения шпиндельного узла, мин ⁻¹	20... 600
4.	Рабочая подача продольного суппорта, мм/мин	50... 500
5.	Дискретность перемещения продольного суппорта, мкм	0,01
6.	Мощность электродвигателя шпинделя, кВт	0,7

Предварительные экспериментальные исследования показывают, что при использовании алмазного монокристаллического инструмента с радиусом округления при вершине 4...5 мм толщина снимаемой стружки на разных режимах составляет от 20 до 400 нм. Таким образом, данный станок может гарантировать при обработке кристаллов группы KDP режим квазипластичного резания.

Для обработки поверхностей сферической и асферической формы деталей из цветных сплавов и хрупких материалов в ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» был разработан и находится на стадии изготовления специальный ультрапрецизионный стенд для алмазного точения деталей из хрупких материалов. Общий вид стенда приведен на рис. 2.

Стенд предназначен для ультрапрецизионной обработки методом алмазного точения и фрезерования широкого спектра различных материалов, включающих в себя: кристаллы (кремний, германий, арсенид галлия, фториды магния и калия и т.д.), полимеры (поликарбонат, полистирол, акрил и т.д.),

металлы (алюминий, серебро, золото, бериллий, медь, платина, свинец, магний, латунь, бронза, никель и т.д.).

Основные параметры станда приведены в таблице 2.

Параметры ультрапрецизионного станда для алмазного точения деталей сферической формы из хрупких материалов		
Таблица 2		
№п/п	Параметр станка	Значение параметра
1.	Габариты обрабатываемых изделий: диаметр, мм длина, мм	100 100
2.	Наибольшее перемещение продольного суппорта, ось Z, мм	200
3.	Наибольшее перемещение поперечного суппорта, ось X, мм	300
4.	Частота вращения шпинделя главного движения, ось S, мин, мин ⁻¹	50... 5000
5.	Частота вращения привода главного движения, ось C, мин, мин ⁻¹	0... 200
6.	Частота вращения шпинделя фрезерно-шлифовальной головки, мин ⁻¹	0... 50000
7.	Диапазон рабочих подач продольного суппорта, ось Z, мм/мин.	0... 200
8.	Диапазон рабочих подач поперечного суппорта, ось X, мм/мин.	0... 200
9.	Диапазон рабочих подач поворотного стола, ось B, мин ⁻¹	0... 10
10.	Дискретность задания перемещения продольного суппорта, мкм	0,001
11.	Дискретность задания перемещения поперечного суппорта, мкм	0,001
12.	Дискретность задания перемещения поворотного стола, ось B, с	0,01

В 2014 году в ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» начались работы по Соглашению с Министерством образования и науки РФ «Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания». В рамках проекта разрабатывается специальный ультрапрецизионный станд, позволяющий производить обработку алмазным абразивным и монокристаллическим инструментом поверхностей различной, в том числе и произвольной формы, деталей из хрупких оптических материалов.

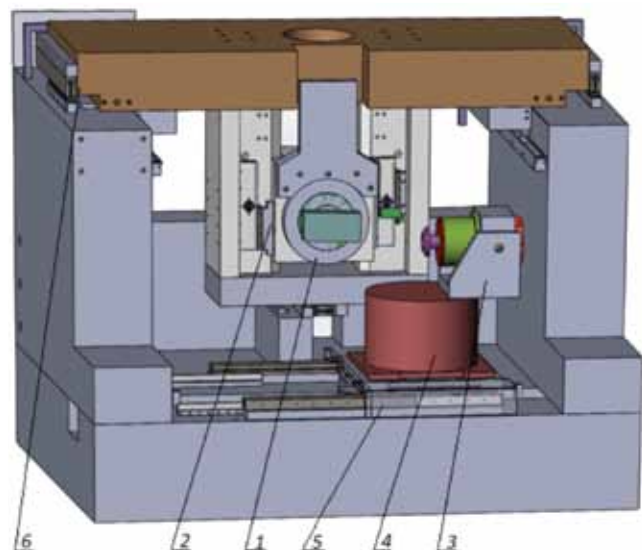


Рис. 3. Схема разрабатываемого сверхжесткого ультрапрецизионного экспериментального станда для алмазного точения и шлифования в квазипластичном режиме:

1 – шпиндель заготовки; 2 – вертикальный суппорт; 3 – инструментальный шпиндель; 4 – поворотный стол; 5 – поперечный суппорт; 6 – продольный суппорт

На рис. 3 приведена схема разрабатываемого станда с обозначением основных узлов.

Основные параметры станда приведены в таблице 3.

Параметры ультрапрецизионного станда для наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания

Таблица 3

№п/п	Параметр станка	Значение параметра
1.	Габариты обрабатываемых изделий: длина, мм	210
	ширина, мм	150
	высота, мм	100
2.	Наибольшее перемещение продольного суппорта, ось Z, мм	150
3.	Наибольшее перемещение поперечного суппорта, ось X, мм	250
4.	Наибольшее перемещение вертикального суппорта, ось X, мм	100
4.	Диапазон частот вращения шпинделя главного движения, ось S, мин ⁻¹	50... 3000
5.	Диапазон частот вращения шпинделя изделия, ось S1, мин ⁻¹	1...1000
6.	Диапазон рабочих подач продольного суппорта, ось Z, мм/мин	0...100
7.	Диапазон рабочих подач поперечного суппорта, ось X, мм/мин	0...100
8.	Диапазон рабочих подач поворотного стола, ось B, мин ⁻¹	0...10
9.	Дискретность задания перемещения продольного суппорта, мкм	0,0001
10.	Дискретность задания перемещения поперечного суппорта, мкм	0,0001
11.	Дискретность задания перемещения поворотного стола, ось B, с	0,0001

В дальнейших планах ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» – разработка технологии изготовления плоских, сферических, асферических и произвольных поверхностей методами алмазного точения и шлифования в режиме квазипластичного резания. Кроме того планируется изготовление узлов и монтаж специального ультрапрецизионного станда для реализации режимов квазипластичного резания при обработке хрупких материалов.

Таким образом, обработка методом пластичного резания с использованием специального инструмента (алмазный круг на металлической связке, резец или фреза) позволяет получить оптическую поверхность при обработке практически любого хрупкого материала, на поверхностях практически любой формы (решетки, поверхности свободной формы с нанометровой точностью и шероховатостью при практически полном отсутствии нарушенного слоя. При этом операция полировки или совсем исключается или минимальна по времени.

1. Теплова Т. Б. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности// Научный вестник МГГУ. – 2010. - №8. – с. 73-88.
 2. Bifano T. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials/ T. Bifano, T. Dow, R. Scattergood// Transaction of ASME. – 1991. – vol. 113 №5. – p. 184-189.
 3. Toh, S. Fine scale abrasive wear of ceramics by a plastic cutting process, in science of hard Materials / S.B. Toh, R. McPherson, ed. E.A. Almond, C.A. Brookes and R.Warren// Bristol and Boston: Adam Hilger Ltd. – 1986. – pp. 865-871.
 4. Blake P. N. Ductile regime machining of germanium and silicon/ P.N. Blake, R. Scattergood// Journal of American Ceramic Society. – 1990. – vol.73, №4. – p. 949-957.
 5. Puttick, K.E. Energy scaling transitions in machining of silicon by diamond/ K.E. Puttick, L.C. Whitmore, P. Zhdan// Tribology International. – 1995. – vol.28. – p. 349-355.
 6. Leung T. P. Diamond turning of silicon substrates in ductile-regime/ T. P. Leung, W.B. Lee// Journal of Materials Processing Tecnology. – 1998. – vol.73. – p.42-48.
- 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»