



# ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ УЛЬТРАПРЕЦИЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Боровский Г.В., Захаревич Е.М., Шавва М.А. ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ", Москва, katapu@mail.ru

В статье приведен обзор уникального ультрапрецизионного оборудования для обработки широкой номенклатуры материалов, разрабатываемого и выпускаемого ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ". Рассматриваются основные подходы по разработке и созданию ультрапрецизионного оборудования, а также параметры станочных узлов и систем.

Современная промышленность все чаще нуждается в технологиях, позволяющих обрабатывать хрупкие материалы, в число которых входят и кристаллы, и другие труднообрабатываемые материалы с оптическим качеством поверхности. Зачастую показатели, отвечающие за качество обработанных деталей в действительности 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 [1–4].

В ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" последние несколько лет проводятся комплексные исследования по разработке и созданию ультрапрецизионного оборудования для обработки широ-

кой 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:

- разработка и применение аэростатических направляющих и опор с пористым дросселированием и вакуумным замыканием;
- разработка и применение специальных виброзолирующих пневматических опор с системой демпфирования на основе сверхвязкой жидкости (500 000 Сст). Собственная частота опор менее 1 Гц;
- разработка и применение встроенных бесконтактных систем демпфирования на основе сверхвязкой жидкости (500 000 Сст);

**Таблица 1.** Параметры ультрапрецизионного стенда для алмазного микрофрезерования кристаллов группы KDP

| Технические параметры  | Значение   |
|--|------------|
| Наибольшие габаритные размеры обрабатываемого изделия, мм  | 450×450×20 |
| Число управляемых координат  | 1          |
| Наибольшее перемещение поперечного суппорта, ось X, мм   | 800        |
| Наибольшее установочное перемещение устройства врезания режущего инструмента, мм                               | 25         |
| Диапазон частот вращения фрезерного шпинделя, ось S, мин <sup>-1</sup>   | 50–500     |
| Отклонение от плоскостности обрабатываемой поверхности на площади 450×450 мм, мкм                              | 0,15       |
| Диапазон рабочих подач поперечного суппорта, ось X, мм/мин   | 0,1–1000   |
| Отклонение от перпендикулярности оси фрезерного шпинделя относительно направляющих поперечного суппорта, угл.с | 0,5        |
| Дискретность задания перемещения поперечного суппорта, мкм   | 0,01       |
| Дискретность тонкого врезания алмазного резца, мкм   | 0,5        |
| Шероховатость поверхности, Rz, мкм, менее  | 0,01       |

- разработка и применение электроприводов прямого действия со встроенной системой охлаждения на базе встроенных маловибрактивных безжелезных двигателей в комплекте с датчиками обратной связи нанометрового разрешения;
- разработка и применение отечественной специальной системой УЧПУ с возможностью программирования линейных перемещений дискретностью  $1\text{ \AA}$ ;
- разработка и применение автоматизированной процедуры обмера и привязки инструмента к системе координат станка с помощью оптического микроскопа;
- разработка и применение автоматизированной процедуры измерения отклонения точности формы обрабатываемой поверхности при помощи контактного щупа с точностью 0,25 мкм непосредственно на станке;
- разработка и применение базовых компонентов оборудования из натурального гранита.

Для обработки плоских поверхностей крупногабаритных кристаллов группы KDP методом алмазного фрезерования был создан специальный ультрапрецизионный экспериментальный стенд "КДП 450 Ф1", представленный на рис.1.



**Рис.1.** Ультрапрецизионный экспериментальный стенд для алмазного микрофрезерования кристаллов "КДП 450 Ф1"

**Таблица 2.** Параметры ультрапрецизионного стенда для алмазного точения деталей сферической формы из хрупких материалов

| Технические параметры  | Значение |
|--|----------|
| Габариты обрабатываемых изделий: диаметр/длина, мм                                 | 100/100  |
| Количество управляемых координат   | 4        |
| Наибольшее перемещение продольного суппорта, ось "Z", мм                           | 200      |
| Наибольшее перемещение поперечного суппорта, ось "X", мм                           | 400      |
| Диапазон частот вращения шпинделя главного движения, ось "S", $\text{мин}^{-1}$    | 50–5000  |
| Диапазон частот вращения привода главного движения, ось "C", $\text{мин}^{-1}$     | 0–200    |
| Диапазон частот вращения шпинделя фрезерно-шлифовальной головки, $\text{мин}^{-1}$ | 0–50000  |
| Диапазон рабочих подач продольного суппорта, ось "Z", мм/мин                       | 0–200    |
| Диапазон рабочих подач поперечного суппорта, ось "X", мм/мин                       | 0–200    |
| Диапазон рабочих подач поворотного стола, ось "B", $\text{мин}^{-1}$               | 0...10   |
| Дискретность задания перемещения продольного суппорта, мкм                         | 0,001    |
| Дискретность задания перемещения поперечного суппорта, мкм                         | 0,001    |
| Дискретность задания перемещения поворотного стола, ось "B", угл. с                | 0,01     |

Стенд предназначен для алмазного микрофрезерования однозубой торцевой фрезой элементов нелинейной оптики из кристаллов группы KDP с шероховатостью поверхности не более 10 нм и точностью поверхности не менее 50 нм на обрабатываемой поверхности размерами  $450\times450$  мм. Основные



**Рис.2.** Ультрапрецизионный стенд для алмазного точения мелкогабаритных сферических и асферических деталей "Сфера-100 Ф4"



**Рис.3.** Сверхжесткий ультрапрецизионный экспериментальный стенд для алмазного точения и шлифования в квазипластичном режиме



**Таблица 3.** Точностные характеристики основных узлов ультрапрецизионного стенда для алмазного точения мелкогабаритных сферических и асферических деталей "Сфера-100 Ф4"

| Параметр  | Значение    |
|---|-------------|
| Шпиндель главного движения:                                       |             |
| радиальное и осевое биение оси шпинделя главного движения         | Менее 50 нм |
| точность позиционирования круговой оси "С"                        | 1 угл. с    |
| Поворотный стол:  |             |
| радиальное и осевое биение оси поворотного стола                  | Менее 50 нм |
| точность позиционирования поворотной оси "В"                      | 1 угл. с    |
| Продольный и поперечный суппорт:                                  |             |
| прямолинейность перемещения суппорта оси "Z" на длине 200 мм, мкм | 0,5         |
| прямолинейность перемещения суппорта оси "Х" на длине 400 мм, мкм | 0,75        |

параметры стенда для алмазного микрофрезерования приведены в табл. 1.

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", позволяющий обрабатывать поверхность без сколов и трещин [4–7].

Для ультрапрецизионной обработки методом алмазного точения и фрезерования широкого спектра различных материалов, включающих в себя: кристаллы (кремний, германий, арсенид галлия, фториды магния и калия), полимеры (поликарбонат, полистирол, акрил), металлы (алюминий, серебро, золото, бериллий, медь, платина, свинец, магний, латунь, бронза, никель) в ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" был разработан и находится на ста-

дии изготовления специальный ультрапрецизионный станд для алмазного точения мелкогабаритных сферических и асферических деталей "Сфера-100 Ф4". Общий вид стенда приведен на рис.2, а параметры – в табл. 2.

Точностные характеристики основных узлов ультрапрецизионного стенда для алмазного точения мелкогабаритных сферических и асферических деталей "Сфера-100 Ф4" приведены в табл. 3, а в табл. 4 приведены точностные характеристики его основных узлов.

В 2014 году в ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" начались работы по Соглашению № 14.579.21.0042 от 25.08.2014 с Министерством

**Таблица 4.** Параметры ультрапрецизионного стенда для наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания

| Технические данные и характеристики                                    | Значения    |
|--|-------------|
| Максимальный размер обрабатываемого изделия, мм                        | 200×100×100 |
| Наибольшее перемещение продольного суппорта (ось Z), мм                | 280         |
| Наибольшее перемещение поперечного суппорта (ось X), мм                | 550         |
| Наибольшее перемещение вертикального суппорта (ось Y), мм              | 150         |
| Дискретность задания перемещения по линейной координате X, нм          | 1           |
| Дискретность задания перемещения по линейной координате Z, нм          | 1           |
| Дискретность задания перемещения по линейной координате Y, нм          | 1           |
| Дискретность задания перемещения по круговой оси С, угл. сек           | 0,005       |
| Дискретность задания перемещения по круговой оси В, угл. сек           | 0,01        |
| Диапазон подач по линейной координате X, мм/мин                        | 0–200       |
| Диапазон подач по линейной координате Z, мм/мин                        | 0–200       |
| Диапазон подач по линейной координате Y, мм/мин                        | 0–200       |
| Диапазон частот вращения шпинделя главного движения, мин <sup>-1</sup> | 0–1000      |
| Диапазон частот вращения инструментального шпинделя, мин <sup>-1</sup> | 0–4 500     |
| Диапазон частот вращения поворотного стола, мин <sup>-1</sup>          | 0–10        |





образования и науки РФ на тему "Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания". В рамках проекта был разработан и создан специальный ультрапрекционный стенд, позволяющий производить обработку алмазным абразивным и монокристаллическим инструментом поверхностей различной, в том числе и произвольной формы, деталей из хрупких оптических материалов.

На рис.3 приведен сверхжесткий ультрапрекционный экспериментальный стенд для алмазного точения и шлифования в квазипластичном режиме.

Основные параметры стенда приведены в табл. 4.

В ходе исследований и разработок установлено, что метод 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Теплова Т.Б.** Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности. – Научный вестник МГГУ, 2010, № 8, с.73–88.  
*Teplova T.B. Kvaziplastichnoe udalenie poverhnostnogo sloja tverdyh hrupkih materialov s polucheniem nanometrovogo rel'efa poverhnosti. – Nauchnyj vestnik MGGU, 2010, № 8, s.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, v.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.
4. **Blake P.N.** Ductile regime machining of germanium and silicon/ P.N.Blaeke, R.Scattergood. – Journal of American Ceramic Society, 1990, v.73, № 4, p.949–957.
5. **Puttik K.E.** Energy scaling transitions in machining of silicon by diamond/ K.E.Puttik, L.C.Whitemore, P.Zhdan. – Tribology International, 1995, v.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 Technology, 1998, v.73, p.42–48.
7. **Захаревич Е.М., Лапшин В.В., Шавва М.А., Грубый С.В.** Экспериментальное определение границ хрупкопластичного перехода при резании хрупких материалов. – Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016, № 7 (676), с. 64–71.  
*Zaharevich E.M., Lapshin V.V., Shavva M.A., Grubyj S.V. Jeksperimental'noe opredelenie granic hrupkoplastichnogo perehoda pri rezaniy hrupkih materialov. – Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie, 2016, № 7 (676), s. 64–71.*

## 79-Й ЭЛЕМЕНТ

К золоту как к металлу непреходящей ценности прибегают не только финансисты во время кризиса, но и физики, когда обкатывают модели теории электронных свойств металлов. Так, характерный цвет золота может быть объяснен лишь с привлечением релятивистских эффектов. Они приводят к уменьшению энергетического зазора между 6s- и 5d-орбиталами до величины около одного электронволта, что делает возможным поглощение фотонов синей части видимого спектра. Именно в этом и заключается секрет пресловутого желтого блеска. Еще сложнее объяснить расхождение между теорией и экспериментом при определении таких электронных характеристик золота, как потенциал ионизации

(энергии, необходимой для отрыва электрона от атома) и сродство к электрону (энергии, выделяющейся или поглощающейся при присоединении дополнительного электрона к атому). Разница между предсказаниями теории и экспериментом составляет около десятка милиэлектронвольт. В научном сообществе это вызвало дискуссию: следует ли данное расхождение сокращать путем более аккуратного учета межэлектронных взаимодействий в атоме или уже требуется привлекать представления о море Дирака (парадокс, умозрительная модель вакуума, объясняющая (или предсказывающая) существование античастиц у фермионов). Международная команда ученых из университетов Окленда (Новая

Зеландия), Братиславы, Тель-Авива и Гронингена (Нидерланды) выбрала более традиционный первый путь, который им позволил уменьшить расхождение на порядок – достигнута точность предсказания электронных характеристик в единицы мэВ [L.F.Pasteka et al. – Phys. Rev. Lett., 2017, v.118, p.023002]. Для этого теоретикам пришлось учитывать не только тройные взаимодействия электронов, но и четверные и даже пятерные корреляции. Всего же в атоме золота 79 электронов – можно представить, сколь труден будет учет корреляций еще более высокого порядка, и ведь на каком-то этапе все-таки придется окунуться в море Дирака!

А.Пятаков, ПерсT, 2017. № 1