

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ (КРИСТАЛЛОВ KDP, DKDP) МЕТОДОМ ЛЕТУЧЕГО РЕЗЦА

А.Е. Образцов

obrazcow2@mail.ru

SPIN-код: 8338-4628

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

В сверхмощных лазерах используются анизотропные кристаллы KDP и DKDP, которые тяжело обрабатывать. Образующиеся микротрещины и подповерхностные трещины негативно влияют на оптические показатели. Предлагаемый подход позволяет решить указанные проблемы при обработке анизотропных кристаллов KDP и DKDP, что способствует повышению качества получаемой поверхности. В статье представлены опыт и исследования по обработке анизотропных кристаллов KDP и DKDP при различных подходах и выполнено сравнение различных подходов, реализуемых на практике. На основании проведенного сравнения и выявления достоинств и недостатков существующих реализаций предложена новая конструкция установки для обработки кристаллов.

Ключевые слова

Метод летучего резца, обработка KDP и DKDP, микрофрезерование, азростатика, ультрапрецизионная обработка, прецизионная обработка, нелинейно-оптические элементы, анизотропные кристаллы, метод флай-каттинг, линейные азростатические направляющие, азростатические каретки, обработка алмазным резцом

Поступила в редакцию 07.12.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Нелинейно-оптические элементы широко используются в лазерной отрасли. Особое положение занимают анизотропные кристаллы KDP (дигидрофосфат калия) и DKDP (дейтерированный дигидрофосфат калия), которые благодаря своим свойствам обеспечивают получение требуемых показателей в сверхмощных лазерах. Среди их достоинств особенно стоит отметить их высокую лучевую стойкость, двулучепреломление, высокую оптическую однородность, хорошую прозрачность, отсутствие накопления лазерных повреждений. К их недостаткам относятся мягкость, хрупкость, повышенная гигроскопичность, низкая теплопроводность и высокий температурный коэффициент расширения.

Для оптической обработки кристаллов KDP и DKDP применяют метод сухого алмазного микрофрезерования поверхности заготовки алмазным инструментом, закрепленным на вращающемся шпинделе ультрапрецизионного фрезерного станка. Вследствие анизотропии кристалла KDP и DKDP твердость поверхности непостоянна, наблюдается образование глубоких микротрещин (до 100 мкм) в материале.

В процессе обработки поверхности кристалла контролируют шероховатость, неплоскостность и прозрачность поверхностного слоя. Шероховатость

и прозрачность влияют на параметры поглощения и отражения луча, неплоскостность — на оптические показатели кристалла.

Для обеспечения требуемых свойств оптики необходимо получить для кристалла KDP размером 420×420 мм шероховатость RMS 1,5 нм, неплоскостность 300 нм, глубину микротрещин менее 10 мкм и их ширину до 0,5 мкм, влияющие на показатель прозрачности.

Сегодня существует установка с вертикальным микрофрезерованием, на которой получают среднеквадратичную шероховатость (RMS) 5 нм и неплоскостность 500 нм на квадратной детали кристалла KDP размером 420×420 мм с глубиной микротрещин до 100 нм. Источниками потери точности являются: отсутствие необходимой жесткости суппортной и шпиндельной группы, наличие вибраций; большая вариация угла направления резания; грубый шаг врезания; автоколебания в аэростатической опоре продольного суппорта; неэффективное удаление стружки.

Международный опыт в обработке нелинейно-оптических элементов (анизотропных кристаллов KDP и DKDP). Прецизионная обработка занимает особое положение в области обработки материалов благодаря требованиям к поверхности. В отличие от обычного формообразования поверхности, где можно использовать направляющие качения, в прецизионной обработке такое недопустимо из-за потерь точности при перемещении, слабого демпфирования вибраций и наличия трения между элементами качения и поверхностью.

Требования к качеству конечной поверхности, получаемой прецизионной обработкой, постоянно повышаются. Так, если в 1950-х точность обработанной поверхности составляла 1 мкм, то теперь она субмикронная. Для получения такой точности применяют линейные направляющие, конструкции которых основаны на принципах аэростатики или гидростатики, а для опор шпинделя — в основном на принципах аэростатики.

Механизм образования стружки в прецизионной обработке заготовок (в нашем случае нелинейно-оптических элементов KDP и DKDP) отличается от обычного стружкообразования, поскольку глубина резания при сверхточной обработке может достигать порядка субмикрометров. При обычном формообразовании качество обработанной поверхности зависит в основном от параметров резания и геометрии инструмента, в то время как влияние свойств материала на чистоту поверхности игнорируется. Однако в прецизионной обработке это нельзя игнорировать, поскольку шероховатость поверхности на микронном уровне зависит от свойств обрабатываемого материала [1].

Кристаллы KDP обладают ярко выраженной анизотропией, как и другие монокристаллы. Было проведено множество экспериментов, которые показали, что твердость по Виккерсу различных граней кристаллов KDP сильно различается, а абсолютная величина и направление нагрузки оказывают большое влияние на поведение кристаллов KDP при изломе [2].

Модуль сдвига, модуль упругости и твердость материала кристалла KDP в разных направлениях плоскости кристаллизации кристалла различны и периодически изменяются, что оказывает значительное влияние на качество конечной обработанной поверхности. Анизотропия кристалла KDP является наиболее важной особенностью материала и имеет большое значение для получения конечной поверхности [2].

Анизотропия монокристалла KDP вызывает изменение твердости в разных направлениях, что изменяет силы резания и в конечном счете приводит к разному качеству поверхности кристаллов KDP. Также отметим, что в процессе формообразования изменения сил резания между инструментом и заготовкой вызывает деформацию и вибрацию как инструмента, так и заготовки, что вызывает изменение их относительного положения и, как следствие изменение поверхности заготовки [2].

В работе [2] показано, что флуктуация структуры поверхности в направлении кристалла под углом 45° является наименьшей, а поверхностная пульсация незначительной, в то время как структура поверхности в направлении кристалла под углом 75° имеет наибольшую флуктуацию с более высокой поверхностной пульсацией.

Следующая проблема при обработке кристаллов KDP и DKDP обусловлена тепловыделением. Были проведены исследования, где показано, что в процессе обработки из-за повышения температуры глубина резания увеличивается в результате теплового расширения инструмента, вследствие чего изменяется качество поверхности [3].

В процессе резания существуют три основных источника теплоты: первый — деформация сдвига в зоне резания, второй — трение между алмазным инструментом и стружкой кристалла KDP, третий — трение между алмазным инструментом и кристаллом KDP [3].

Известны разные компоновочные решения для обработки KDP и DKDP. В статье [4] представлен станок для обработки кристаллов. Среди достоинств данной конструкции стоит отметить применение гидростатических опор линейных направляющих и опор вращения, а также относительно малую массу и габариты конструкции, что позволяет уменьшить погрешности обработки при расширении материала.

Обработка реализуется с помощью трех линейных осей и двух поворотных осей. Все пять осей оснащены гидростатическими подшипниками и устанавливаются на гранитную станину [4].

Перемещение выполняется моментными двигателями и гидростатическими ходовыми винтами. Благодаря оптимизированной конструкции и гидростатическим подшипникам станок обеспечивает не только очень высокую пространственную точность позиционирования по пяти осям, но и очень высокую статическую и динамическую жесткость [4].

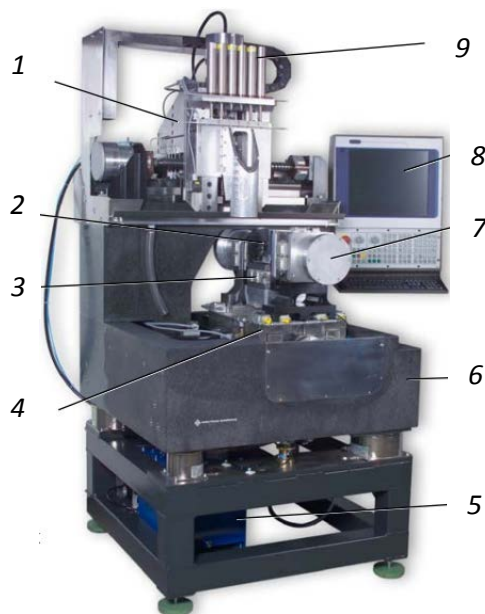


Рис. 1. Пятиосевой прецизионный станок [4]:

1 — перекрестное основание, размещенное под углом 45° с гидростатическими направляющими и приводы крутящего момента с помощью гидростатических ходовых винтов; 2 — заготовка ($70 \times 70 \times 70$ мм); 3 — поворотная платформа с гидростатическим двухконусным подшипником и прямым приводом; 4 — линейная ось с гидростатическими направляющими и привода передающий момент от гидростатического ходового винта; 5 — система возврата масла; 6 — гранитное основание станка на самовыравнивающемся демпфирующем узле; 7 — поворотная ось с гидростатическим двойным конусом / радиальным подшипником и двойным прямым приводом; 8 — панель управления оператора; 9 — магнитный компенсатор

Следующая конструкция станка [5] представляет собой закрытую раму (портального типа) и имеет симметричную форму, что позволяет повысить жесткость станка и уменьшить термическую деформацию. Теплота от подшипника шпинделя и двигателя создает симметричный температурный профиль. Установка шпинделя в портале обеспечивает более жесткую конструкцию замкнутого профиля между инструментом и обрабатываемой деталью и меньшую инерцию вращения вокруг длинной оси переключки [5].

Сочетание опорных подшипников, работающих под давлением, с новым магнитным упорным подшипником позволило разработать конструкцию шпинделя с осевым вращением, дающую возможность осуществлять как вращательное движение при обработке, так и линейное перемещение в миллиметровом диапазоне вдоль осевого направления при подаче. К преимуществам таких вращательно-осевых шпинделей относятся более жесткая конструкция, меньшее число компонентов, более высокая точность и разрешающая способность, а также меньшее тепловыделение [6].

В конструкции станка разработан и используется новый держатель инструмента для реализации осевой подачи, который состоит из поворотного стола, держателя инструмента, подающего вала и режущего инструмента. Это устройство позволяет осуществлять подачу на микронном уровне в осевом направлении, а также точную регулировку угла наклона инструмента в окружном направлении. Применение такого держателя позволяет не только упростить конструкцию и уменьшить число движущихся частей, но и сократить длину контура конструкции и улучшить динамические характеристики станка [5].

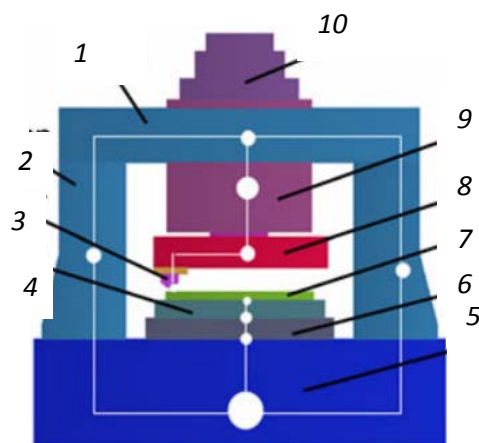


Рис. 2. Компоновочное решение станка микрофрезерования [5]:

1 — перекладина; 2 — колонна; 3 — резец; 4 — вакуумный стол; 5 — основание;
6 — ось X; 7 — заготовка; 8 — планшайба; 9 — шпиндель; 10 — мотор шпинделя

Конфигурация фрезерного станка показана на рис. 2. Конструкция включает станину станка, колонны, регулировочных накладок, сферических накладок и балки. Кроме того, используется новая технология для обеспечения перпендикулярности оси шпинделя обрабатываемой детали. В этой технологии используются три пары сферических опор (две с правой стороны и одна с левой), образующие равнобедренный треугольник путем перекручивания винтов для выравнивания оси шпинделя по горизонтальному ходу ползуна. На горизонтальном суппорте установлен вакуумный патрон, который фиксирует заготовку с помощью подаваемого вакуума. Обрабатываемая поверхность лежит в горизонтальной плоскости. Для обеспечения высокой точности позиционирования и плавности перемещения в шпинделе с вертикальной осью применяются аэро-статические подшипники. Повышение осевой жесткости обеспечивается благодаря большой опорной поверхности. Для повышения жесткости при механической обработке в суппорте с горизонтальной осью используются гидростатические подшипники [5].

Существующая установка микрофрезерования. Установка с вертикальным микрофрезерованием (АМФ) применяется для обработки нелинейно-оптических элементов методом летучего резца анизотропных кристаллов KDP и DKDP. Лучший результат конечной поверхности для детали размером 420×420 мм — шероховатость RMS 5 нм и неплоскостность 500 нм. Данные параметры значительно отличаются от требуемых (шероховатость RMS 1,5 нм, неплоскостность 300 нм).

Установка без ограждения показана на рис. 3. Глубина резания настраивается инструментальной оправкой, показанной на рис. 4. Формообразование поверхности выполняется двумя движениями — вращением фрезы и линейным перемещением суппорта. Шпиндельный узел, к которому крепится фреза, монтируется на несущую балку, изготовленную из габбро-диабазы, которая соединена с неподвижными опорными стойками, стационарно установленными на станине из того же материала. На суппорте линейного перемещения располагается вакуумный стол. Все базовые компоненты установки (станина, портал, суппортная группа) выполнены из натурального габбро-диабазы.

Благодаря применению аэростатических опор сухое трение в основных исполнительных механизмах установки (шпиндельная группа, суппортная группа) отсутствует. Фрезерный шпиндель устанавливается в сферические радиально-упорные аэростатические опоры с пористым дросселированием, а суппорт перемещается по линейным аэростатическим направляющим с пористым дросселированием и вакуумным натяжением.

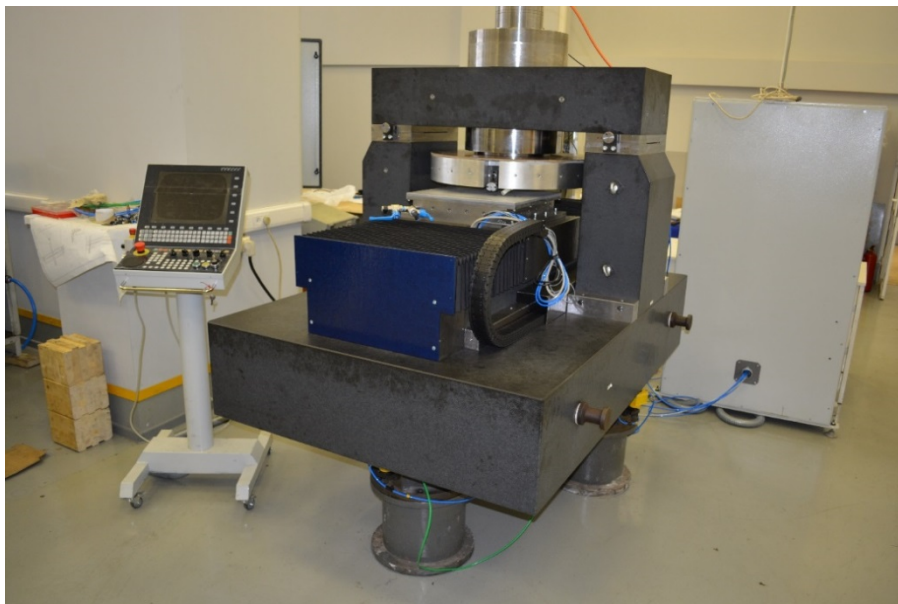


Рис. 3. Существующая установка без ограждения для обработки нелинейно-оптических элементов



Рис. 4. Настройка глубины врезания

Направляющие с пневматическими опорами позволяют устранять шум, гистерезис или люфт, который связан с механическими приводами. Такие направляющие уже нашли широкое применение в метрологическом оборудовании и прецизионных контрольно-измерительных приборах, где первостепенное значение имеют высокая точность позиционирования и плавность перемещения. Точность и плавность перемещения направляющих с пневмоподвеской с прямым приводом также служат преимуществами в других областях применения, например, в сверхточных станках, где направляющие могут испытывать значительные динамические и статические нагрузки. Суппорт может потребоваться для поддержки инструмента или заготовки и должен выдерживать нагрузки, создаваемые в процессе механической обработки. Как правило, эти нагрузки имеют постоянную составляющую, зависящую от среднего размера заготовки и скорости резания, а также зависящую от времени составляющую, генерируемую такими факторами, как локальные колебания геометрии инструмента или заготовки [7].

Массивная станина из габбро-диабазы устанавливается на трех пневматических виброизолирующих опорах, обеспечивающих эффективную изоляцию от внешних вибраций с частотой выше 3 Гц.

Система УЧПУ (устройства числового программного управления) фирмы ЗАО «Микрос» (Россия) с дискретностью задания линейных перемещений 0,01 мкм, обеспечивает работу всех узлов и механизмов установки (за исключением ручного врезания режущего инструмента на глубину резания).

Вращение инструментального шпинделя осуществляется с помощью встроенного маловиброактивного синхронного серводвигателя переменного тока с постоянными магнитами на роторе (мотор-шпиндель фирмы «EDEL» (Швейцария)).

Линейное перемещение каретки продольного суппорта реализуется встроенным линейным безжелезным синхронным электродвигателем переменного тока с постоянными магнитами в магнитной дорожке, разработанным фирмой “Aerotech” (США).

В качестве датчиков обратной связи по скорости и положению применяются оптические линейки фирмы “Renishaw” (Великобритания) с разрешающей способностью 0,01 мкм.

Управление электродвигателями шпинделя и суппорта осуществляется контроллером фирмы «Модем-Техно» (Россия), который получает управляющее задание от ЧПУ по оригинальному цифровому протоколу связи.

В процессе эксплуатации были выявлены некоторые недостатки применяемых конструкторских решений. Минимально возможная глубина резания составляет 1 мкм, что недостаточно для реализации уверенного режима квазипластичного резания в процессе микрофрезерования. Попадание стружки из зоны резания на обработанную поверхность вызывает появление царапин, либо, в худшем случае, ее прилипание. Вертикальная конструкция установки ограничивает применение планшайбы большого диаметра, как следствие, возможны большие колебания угла направления резания. В анизотропных кристаллах KDP и DKDP в процессе обработки изменяется твердость, что приводит к микротрещинам системы «станок — приспособление — инструмент — деталь» (СПИД) и, как следствие, к разной глубине резания.

Портальная конструкция установки с подвешенным между опорных стоек инструментальным шпинделем существенно затрудняет юстировку установки с целью управляемого процесса улучшения точности формы поверхности обрабатываемого кристалла, что в сочетании с прогибом несущей балки не позволяет получить точность формы лучше 500 нм.

Существенным недостатком конструкции является ручной процесс врезания на глубину резания, что приводит к обязательному останову габаритной и массивной вращающейся фрезы и последующему ее разгону до заданной частоты вращения.

Предлагаемая конструкция установки для обработки нелинейно-оптических элементов методом летучего резца процесса микрофрезерования. Установка имеет гранитную станину, которая установлена на четырех пневмоопорах, гасящих внешние вибрации от оборудования и станков. Суппортные группы и корпуса также изготовлены из данного материала (рис. 5).

Гранит широко применяется в прецизионных станках и измерительных машинах благодаря своим свойствам: хорошей прочности на сжатие, высокой теплоемкости, твердости, стабильности, отсутствию внутренних напряжений, улучшенным демпфирующим свойствам, позволяющим гасить как внешние, так и создаваемые установкой вибрации. Все вышеперечисленные качества помогают достичь высокую точность позиционирования и повторяемость обработки, что позволяет получить детали с наименьшим допуском и шероховатостью [8].

Предложенная установка имеет два линейных перемещения и одну ось вращения. На суппорте линейной оси X установлена каретка, к которой крепится вакуумный стол. На суппорте линейной оси Y , которая расположена перпендикулярно к суппортной группе оси X , устанавливается шпиндельный узел, приводящий во вращение фрезу. Оправка, в которой крепится инструмент, имеет жесткую конструкцию. Опоры всех осей аэростатические. Подача воздуха выполняется через пористый графит с размером пор $3...9$ мкм.

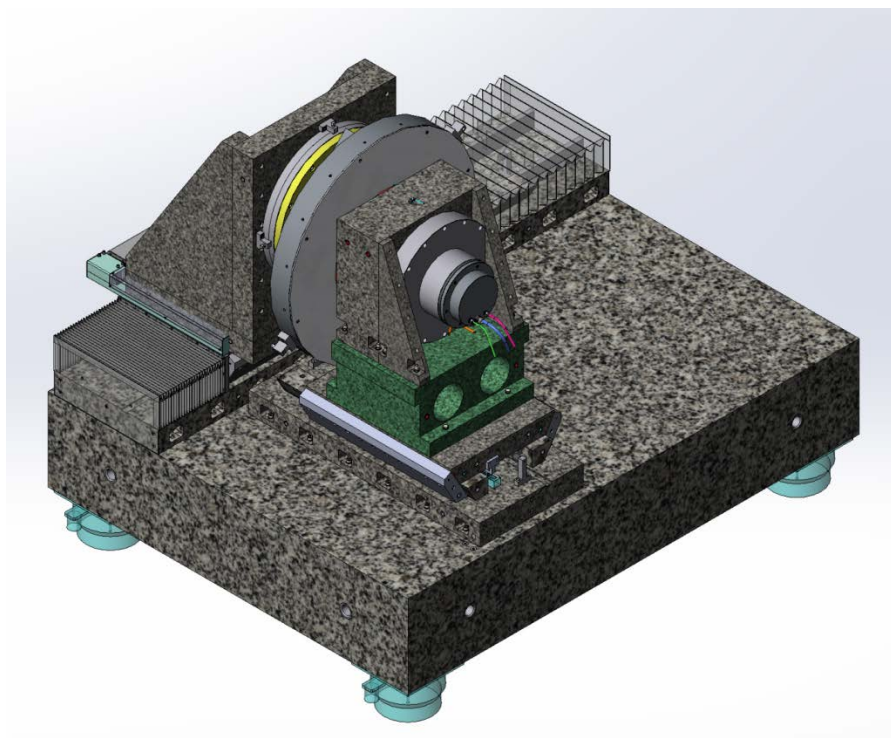


Рис. 5. Предложенная конструкция установки

На основе имеющихся данных можно утверждать, что применяемая установка микрофрезерования обладает высокой жесткостью суппортной группы, но недостаточной по причине отсутствия замкнутого контура аэростатических опор. По этой причине решено использовать перемещение суппортных групп с помощью аэростатических направляющих (рис. 6), что проще и дешевле по сравнению с гидростатическими направляющими. Наличие вакуума для уравнивания каретки создает автоколебания в системе, поэтому принято решение отказаться от него и применять направляющие замкнутой конструкции. Реализация данной конструкции сложнее, однако это позволяет увеличить жесткость установки.

Большие преимущества применения аэростатических направляющих — точность перемещения опор и отсутствие трения, позволяющие минимизиро-

вать нагрев поверхности перемещения. Применение пористого материала на примере графита позволяет равномерно распределить воздух в зазоре, таким образом, давление получается максимально равномерным [9]. В качестве материала для изготовления ограничителя (вставки) выбран графит. Аэростатические опоры шпиндельного узла, не имеющие трения, потребляют малую мощность и обладают высокой точностью перемещения [10].

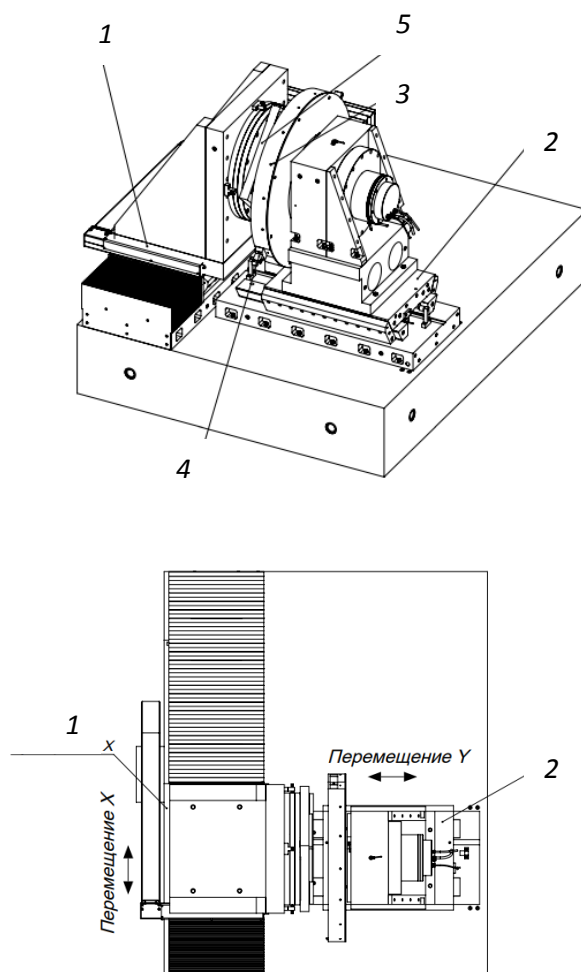


Рис. 6. Схема предложенной конструкции установки:

1 — суппорт оси X; 2 — суппорт оси Y; 3 — фреза с закрепленным резцом;
4 — резец с резцедержкой; 5 — вакуумная планшайба

Горизонтальное расположение рабочих органов станка позволяет расширить масштаб обрабатываемых заготовок и повысить их качество поверхности. Во-первых, увеличивается диапазон толщины заготовок, поскольку данная величина зависит от перемещения, размер которого 150 мм. Во-вторых, такая

конструкция облегчает удаление стружки, поскольку под воздействием силы тяжести она падает вниз, а не на деталь. В-третьих, вследствие увеличения диаметра фрезы до 1000 мм уменьшаются вариации углов направления резания. В-четвертых, благодаря применению линейных двигателей и высокоточных преобразователей линейных перемещений уменьшается глубина подачи, что позволит выполнять перемещения от 100 нм с точностью до 20 нм.

Заключение. Рассмотрен международный опыт обработки нелинейно-оптических элементов. Исследованы проблемы обработки анизотропных кристаллов KDP и DKDP и предлагаемые пути их решения. Рассмотрено несколько конструкций установок для их обработки.

Существующие установки для микрофрезерования не решают поставленные задачи обработки нелинейно-оптических элементов. К основным проблемам, которые имеют наибольшее значение, относятся наличие вибраций, грубая настройка глубины резания, большая вариация угла направления резания, удаление стружки.

На основе опыта иностранных коллег и проведенного анализа недостатков существующих установок была предложена модификация существующей конструкции, позволяющая расширить функционал обработки нелинейно-оптических элементов методом микрофрезерования и улучшить качество конечной поверхности анизотропных кристаллов KDP и DKDP. Предложенные конструкторские решения опираются на мировой опыт и являются хорошим выбором при конструировании прецизионного оборудования.

Литература

- [1] Wang S.J., To S., Cheung C.F. An investigation into material-induced surface roughness in ultra-precision milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 68 (1–4). <http://doi.org/10.1007/s00170-013-4781-8>
- [2] Dongju Chen, Shupe Li, Jinwei Fan. Effect of KDP-Crystal Material Properties on Surface Morphology in Ultra-Precision Fly Cutting. *Micromachines*, 2020, vol. 11 (9). <http://doi.org/10.3390/mi11090802>
- [3] Pengqiang Fu, Junqi Xue, Lijie Zhou, Yiwen Wang, Zhikun Lan, Lan Zhan, Feihu Zhang. Influence of the heat deformation of ultra-precision fly cutting tools on KDP crystal surface microstructure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 1009–1018. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03578-5>
- [4] Brecher C., Utsch P., Klar R., Wenzel C. Compact design for high precision machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (4), pp. 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.11.007>
- [5] Yingchun Liang, Wanqun Chen, Qingshun Bai, Yazhou Sun, Guoda Chen, Qiang Zhang, Yang Sun. Design and dynamic optimization of an ultraprecision diamond fly cutting machine tool for large KDP crystal machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 69, pp. 237–244. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5020-z>

- [6] Lu X.D., Paone M.P., Usman I., Moys B., Smeds K., Rotherhofer G., Slocum A.H. Rotary-axial spindles for ultra-precision machining. *CIRP Annals*, 2009, vol. 58 (1), pp. 323–326. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.042>
- [7] Wardle Frank P., Bond C., Wilson C., Cheng K., Huo D. Dynamic characteristics of a direct-drive air-bearing slide system with squeeze film damping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 47, pp. 911–918. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2139-z>
- [8] Gurav Kailas V., Kale V.M., Sah Akash. Epoxy-Granite Properties using Indian Origin Granite. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2020, vol. 9, iss. 3. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C6490.029320>
- [9] Vainio V., Miettinen M., Majuri J., Theska R., Viitala R. Manufacturing and static performance of porous aerostatic bearings. *Precision Engineering*, 2023, vol. 84, pp. 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.06.014>
- [10] Hailong Cui, Dajiang Lei, Xinjiang Zhang, He Lan, Zhengyi Jiang, Lingbao Kong. Measurement and analysis of the radial motion error of aerostatic ultra-precision spindle. *Measurement*, 2019, vol. 137, pp. 624–635. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.089>

Образцов Александр Евгеньевич — аспирант кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Утенков Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Металлорежущие станки», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Образцов А.Е. Повышение качества обработки нелинейно-оптических элементов (кристаллов kdp, dkdp) методом летучего резца. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 12 (89). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-957>

IMPROVING QUALITY OF THE NONLINEAR OPTICAL ELEMENTS (KDP AND DKDP CRYSTALS) MACHINING BY THE FLYING CUTTER METHOD

A.E. Obraztsov

obrazcow2@mail.ru
SPIN-code: 8338-4628

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Superpower lasers are using the anisotropic KDP and DKDP crystals, which are difficult to machine. The resulting micro-cracks and subsurface cracks negatively affect the optical performance. The proposed approach makes it possible to solve these problems in machining the anisotropic KDP and DKDP crystals, which assists to improve the resulting surface quality. The article presents experience and research on machining the anisotropic KDP and DKDP crystals using various approaches and compares various approaches implemented in practice. Based on comparison and identification of the existing implementation advantages and disadvantages, the article proposes a new design of the crystals machining device.

Keywords

Flying cutter method, KDP and DKDP machining, micro-milling, aerostatics, ultra-precision machining, precision machining, nonlinear optical elements, anisotropic crystals, fly-cutting method, linear aerostatic guides, aerostatic carriages, diamond cutter machining

Received 07.12.2023
© Bauman Moscow State Technical
University, 2023

References

- [1] Wang S.J., To S., Cheung C.F. An investigation into material-induced surface roughness in ultra-precision milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 68 (1–4). <http://doi.org/10.1007/s00170-013-4781-8>
- [2] Dongju Chen, Shupe Li, Jinwei Fan. Effect of KDP-Crystal Material Properties on Surface Morphology in Ultra-Precision Fly Cutting. *Micromachines*, 2020, vol. 11 (9). <http://doi.org/10.3390/mi11090802>
- [3] Pengqiang Fu, Junqi Xue, Lijie Zhou, Yiwen Wang, Zhikun Lan, Lan Zhan, Feihu Zhang. Influence of the heat deformation of ultra-precision fly cutting tools on KDP crystal surface microstructure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 103, pp. 1009–1018. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03578-5>
- [4] Brecher C., Utsch P., Klar R., Wenzel C. Compact design for high precision machine tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2010, vol. 50 (4), pp. 328–334. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.11.007>
- [5] Yingchun Liang, Wanqun Chen, Qingshun Bai, Yazhou Sun, Guoda Chen, Qiang Zhang, Yang Sun. Design and dynamic optimization of an ultraprecision diamond fly cutting machine tool for large KDP crystal machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 69, pp. 237–244. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5020-z>

-
- [6] Lu X.D., Paone M.P., Usman I., Moys B., Smeds K., Rotherhofer G., Slocum A.H. Rotary-axial spindles for ultra-precision machining. *CIRP Annals*, 2009, vol. 58 (1), pp. 323–326. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.042>
- [7] Wardle Frank P., Bond C., Wilson C., Cheng K., Huo D. Dynamic characteristics of a direct-drive air-bearing slide system with squeeze film damping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 47, pp. 911–918. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2139-z>
- [8] Gurav Kailas V., Kale V.M., Sah Akash. Epoxy-Granite Properties using Indian Origin Granite. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2020, vol. 9, iss. 3. <https://doi.org/10.35940/ijeat.C6490.029320>
- [9] Vainio V., Miettinen M., Majuri J., Theska R., Viitala R. Manufacturing and static performance of porous aerostatic bearings. *Precision Engineering*, 2023, vol. 84, pp. 177–190. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2023.06.014>
- [10] Hailong Cui, Dajiang Lei, Xinjiang Zhang, He Lan, Zhengyi Jiang, Lingbao Kong. Measurement and analysis of the radial motion error of aerostatic ultra-precision spindle. *Measurement*, 2019, vol. 137, pp. 624–635. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.089>

Obraztsov A.E. — Postgraduate, Department of Metal-Cutting Machine Tools, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Utenkov V.M., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Department of Metal-Cutting Machine Tools, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Obraztsov A.E. Improving quality of the nonlinear optical elements (kdp and dkdp crystals) machining by the flying cutter method. *Politeknicheskii molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 12 (89). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-12-957>