



Технология обработки оптических деталей из кристаллов КРС-5 методом алмазного точения и фрезерования

В. В. Лапшин¹, Е. М. Захаревич¹, М. С. Кузнецов²,
К. С. Зараменских², А. В. Осипов³

¹ ООО «Научно-производственное предприятие
Станкостроительный завод «Туламаш»

² АО «Государственный научно-исследовательский
и проектный институт редкометаллической
промышленности «Гиредмет»

³ ООО «Научно-производственная компания
«МакроОптика»

Статья посвящена разработке технологии обработки заготовок из кристаллов КРС-5. Экспериментально определен оптимальный метод обработки, а также способ определения оптимальной ориентации заготовки. Разработанная технология опробована при изготовлении светоделительного кольца. Приведены результаты метрологического контроля кольца, а также способы улучшения качества и точности обработки.

Ключевые слова: алмазный резец, алмазное фрезерование, алмазное точение, оптические детали, ультрапрецизионные станки, монокристаллы КРС-5

Статья получена: 05.01.2021
Принята к публикации: 18.02.2021

ВВЕДЕНИЕ

Оптическое приборостроение инфракрасного (ИК) диапазона является важнейшим направлением развития передовых отраслей техники, в том числе в связи с возрастающими требованиями к спектрометрическим исследованиям в инфракрасной области на предприятиях нефтегазовой и фармацевтической промышленности. Создание оптических приборов невозможно без таких элементов как окна, линзы, призмы, зеркала, светоделители и т. д., для изготов-

Technology of Machining Optical Parts Made of KRS-5 Crystals by Diamond Turning and Milling

V. V. Lapshin¹, E. M. Zakharevich¹, M. S. Kuznetsov²,
K. S. Zaramenskikh², A. V. Osipov³

¹ Research and Production Enterprise Machine-Tool Plant
“Tulamash”, LLC

² State Research and Design Institute of Rare Metal Industry
“Giredmet”, JSC

³ Research and Production Company “MacroOptics”, LLC

The article concerns the development of a technology for machining workpieces from KRS-5 crystals. The optimal machining method, as well as the method for determining the optimal orientation of the workpiece, was experimentally determined. The developed technology was tested in the manufacture of a beam-splitting ring. The results of metrological control of the ring, as well as ways of improving the quality and accuracy of machining are presented.

Keywords: diamond cutter, diamond milling, diamond turning, optical components, ultra-precision machine tools, KRS-5 monocrystals

Received on: 05.01.2021

Accepted on: 18.02.2021

INTRODUCTION

Optical instrumentation of the infrared (IR) range is an important direction in the development of advanced branches of technology, including in connection with the increasing requirements for spectrometric research in the infrared range at enterprises of the oil and gas and pharmaceutical industries. The creation of optical devices is impossible without such elements as windows, lenses, prisms, mirrors, beam splitters, etc., for the manufacture of which optical materials with a complex of mechanical, chemical, optical properties that meet a set of specific requirements must be investigated and manufactured.



ления которых должны быть исследованы и изготовлены оптические материалы, обладающие комплексом механических, химических, оптических свойств, отвечающих набору конкретных требований.

Одним из наиболее перспективных оптических материалов являются кристаллы галогенидов таллия, обладающие равномерной прозрачностью в очень широком диапазоне длин волн, охватывающем видимую и среднюю инфракрасную области спектра от 0,35 до 50 мкм (в зависимости от состава), 0,54–50 мкм для КРС-5 (TlBr–TlI). Пропускание составляет до 70% при отсутствии полос поглощения. Величина оптических потерь определяется коэффициентом отражения, соответственно при нанесении просветляющего покрытия может быть достигнуто абсолютное пропускание. Кристаллы обладают механической, вибрационной прочностью, химической и влагостойкостью, благодаря чему пригодны для работы в атмосферных условиях без специальной защиты [1–3].

Совокупность всех вышеперечисленных характеристик дает возможность улучшить свойства оборудования по сравнению с существующими аналогами в диапазоне до 10 мкм, а также создавать приборы, работающие в диапазоне от 10 до 50 мкм, не имеющие аналогов, при использовании кристаллов КРС-5.

Основной проблемой является сложность оптической обработки кристаллов галогенидов таллия из-за мягкости и пластичности материала, высокого коэффициента термического расширения, низкой теплопроводности, а также высокой анизотропии. Используемые традиционно технологии обработки приводят к образованию глубокого нарушенного слоя кристаллической структуры при шлифовке и низкому выходу в годное при финишной доводке оптической поверхности ручной полировкой.

В связи с указанными выше недостатками традиционных способов обработки кристаллов предлагается в качестве альтернативного способа использовать алмазную лезвийную обработку на ультра прецизионных станках, которая позволит избежать образования значительного поврежденного слоя, шаржирования абразивными частицами обработанной поверхности, а также высоких температур обработки. Также алмазная лезвийная обработка изделий из КРС-5, проведенная без СОЖ (смазочно-охлаждающих жидкостей) в герметичном кабинете, позволит собрать стружку, которую можно будет использовать повторно при выращивании кристаллов. Алмазная лезвийная обработка позволит обеспечить необходимое качество и точность обрабатываемой поверхности, а также в разы повысить производительность. Как правило,

One of the most promising optical materials are thallium halide crystals with uniform transparency in a very wide wavelength range, covering the visible and mid-infrared spectral regions from 0.35 to 50 μm (depending on the composition), 0.54 to 50 μm for KRS-5 (TlBr–TlI). The transmission is up to 70% in the absence of absorption bands. The magnitude of the optical loss is determined by the reflectance; accordingly, when applying an antireflection coating, absolute transmission can be achieved. Crystals have mechanical, vibration, chemical and moisture resistance, making them suitable for work in atmospheric conditions without special protection [1–3].

The combination of all the above characteristics makes it possible to improve the properties of equipment in comparison with existing analogues in the range up to 10 microns, as well as to create devices operating in the range from 10 to 50 microns, which have no analogues, using KRS-5 crystals.

The main problem is the complexity of optical machining of thallium halide crystals due to the softness and plasticity of the material, high coefficient of thermal expansion, low thermal conductivity, and high anisotropy. Conventional machining technologies lead to the formation of a deep damaged layer of the crystal structure during grinding and a low yield to usable when finishing the optical surface by hand polishing.

In connection with the above disadvantages of conventional methods of machining crystals, it is proposed as an alternative way to use diamond machining with cutting tool on ultra-precision machines, which will avoid the formation of a significant damaged layer, charge of the treated surface with abrasive particles, as well as high machining temperatures. Also, diamond machining of products from KRS-5, carried out without coolant in a sealed cabinet, will allow collecting chips that can be reused when growing crystals. Diamond machining will ensure the required quality and precision of the machined surface, as well as significantly increase productivity. As a rule, the surface roughness of optical products made from KRS-5 is R_a 0.01 μm , and the accuracy depends on the shape and purpose of the products.

Thus, the following technological tasks for the machining of KRS-5 crystals have been set: to work out the optimal modes of diamond machining; work out a way to determine the optimal crystal orientation; determination of the optimal way of basing the workpiece.

TECHNOLOGICAL UNIT DESCRIPTION

Pilot machining of KRS-5 crystals was carried out at the pilot production facility of Research and Produc-

шероховатость поверхности оптических изделий из КРС-5 составляет $Ra\ 0,01\ \mu\text{м}$, а точность зависит от формы и назначения изделий.

Таким образом, поставлены следующие технологические задачи по обработке кристаллов КРС-5: отработать оптимальные режимы лезвийной алмазной обработки; отработать способ определения оптимальной ориентации кристалла; определить оптимальный способ базирования заготовки.

ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Экспериментальная обработка кристаллов КРС-5 выполнена на опытном производстве ООО «НПП Станкостроительный завод «Туламаш» на ультра прецизионном станде (рис. 1), который имеет следующие конструктивные особенности:

- аэростатические опоры щелевого типа на суппортах продольного и поперечного перемещений;
- аэростатический инструментальный шпиндель и шпиндель изделия;
- станина станка установлена на виброизолирующих опорах;
- пневматический привод продольного и поперечного суппорта;
- разрешение системы перемещений по линейным осям составляет $0,1\ \mu\text{м}$.

На станде реализована возможность обработки кристаллов КРС методом фрезерования однорезцовой головкой (fly cutting), а также точением. Для проведения исследований спроектирована и изготовлена специальная оснастка, необходимая для закрепления обрабатываемого изделия. Оснастка состоит из вакуумной планшайбы, а также фиксирующего кольца.

Перед проведением исследований на станке был проведен ряд подготовительных операций:

- выставление оси шпинделя изделия относительно направляющих оси X в горизонтальной и вертикальной плоскости;
- выставление параллельности оси инструментального шпинделя и шпинделя изделия в вертикальной и горизонтальной плоскости;
- балансировка однорезцовой фрезерной головки.

tion Enterprise Machine-Tool Plant “Tulamash”, LLC on an ultra-precision machine tool (Fig. 1), which has the following design features:

- slot type aerostatic supports on longitudinal and transverse movements;
- aerostatic tool spindle and product spindle;
- machine bed is installed on vibration-insulating supports;
- pneumatic drive of the longitudinal and transverse support;
- resolution of the linear axis displacement system is $0.1\ \mu\text{m}$.

The machine tool offers the possibility of machining KRS crystals by fly cutting, as well as by turning. To carry out research, special equipment was designed and manufactured, which is necessary for fixing the workpiece. The equipment consists of a vacuum faceplate and a retaining ring.

Before conducting research on the machine tool, a number of preparatory operations were carried out:

- setting the spindle axis of the product relative to the X-axis guides in the horizontal and vertical planes;
- setting the parallelism of the axis of the tool spindle and the product spindle in the vertical and horizontal plane;
- balancing a single-cutter head.

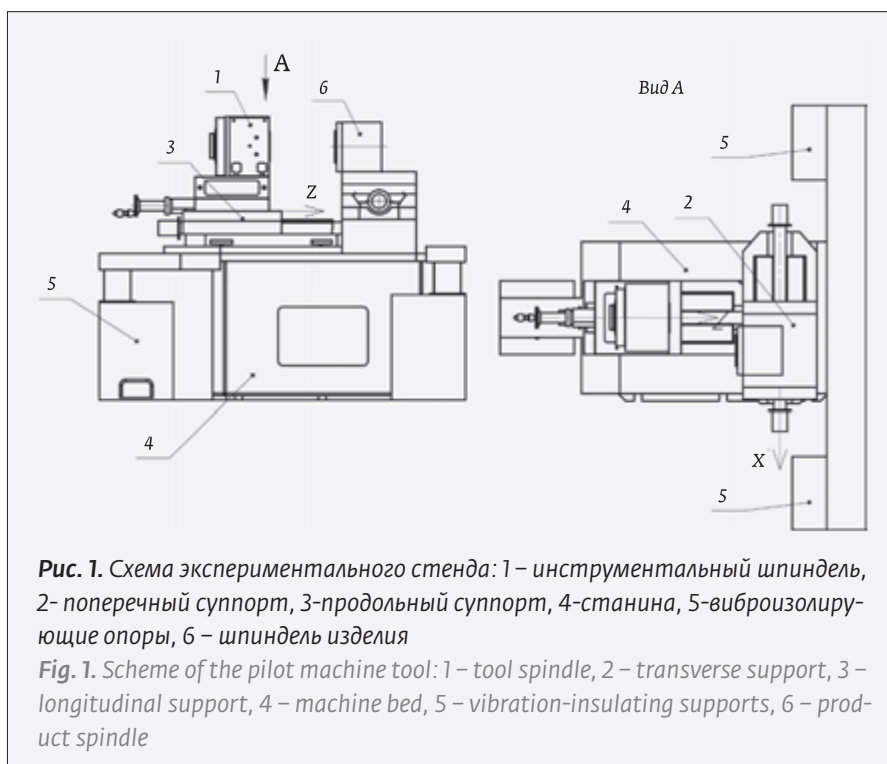


Рис. 1. Схема экспериментального станда: 1 – инструментальный шпиндель, 2 – поперечный суппорт, 3 – продольный суппорт, 4 – станина, 5 – виброизолирующие опоры, 6 – шпиндель изделия

Fig. 1. Scheme of the pilot machine tool: 1 – tool spindle, 2 – transverse support, 3 – longitudinal support, 4 – machine bed, 5 – vibration-insulating supports, 6 – product spindle

8 (800) 700-87-09
info@cnc-tulamash.ru

300002, Россия, г. Тула,
ул. Мосина, д. 2

www.cnc-tulamash.ru



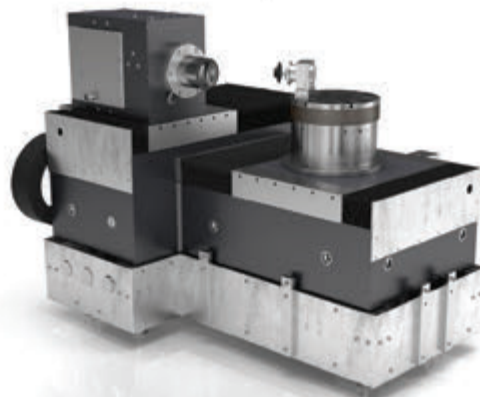
НПП Станкостроительный завод

ТУЛАМАШ

Производитель многофункциональных ультрапрецизионных обрабатывающих центров для изготовления оптических изделий из металлов и кристаллов, методами точения, фрезерования, шлифования и полирования



Технологии механообработки
и оборудование



Приборостроение



Медицина



ВПК



Аэрокосмос



Оптика

Технологии обработки
для достижения субмикронной
точности:

- Алмазное точение;
- Точение с ультразвуком;
- Алмазное шлифование;
- Твердое точение;
- Фрезерование летучим резцом.



Материал: Титан
Обработка: Шлифование/полирование
Ra = 0,036 мкм



Материал: КРС - 5
Обработка: Фрезерование
Ra = 0,082 мкм

Машины и оборудование:

- Серия УТМ: 2-5 осевые токарно/фрезерно/шлифовальные обрабатывающие центры.
Материалы: кристаллы и металлооптика
- Серия ТМ: 5-6 осевые токарно-фрезерные обрабатывающие центры.
Материалы: детали точной механики из стали и сплавов



Процесс сборки



Процесс тестирования вибрационных характеристик станка



Рис. 2. Алмазные резцы
Fig. 2. Diamond cutters

В качестве режущего инструмента при исследованиях использовались алмазные резцы с радиусами при вершине r 1 мм и 5 мм (рис. 2) с нулевым передним углом. Для крепления алмазных резцов разработан специальный держатель, который устанавливается в корпус однорезцовой головки.

Базовая поверхность вакуумной планшайбы также была обработана алмазным резцом после выполнения всех подготовительных операций.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КРС-5

Предварительные эксперименты по обработке цилиндрической заготовки из КРС-5 были проведены по токарной схеме (заготовка вращается вокруг своей оси, инструменту сообщается движение подачи). Обработка торца образца из КРС-5 показала, что кристаллографическая ориентация влияет на качество поверхности, так как на заготовке визуально наблюдалось чередование зон хрупкого разрушения и зон, где на поверхности не наблюдалось дефектов (рис. 3). В связи с тем, что изменение режимов обработки не привело к устранению дефектных зон, было принято решение отказаться от токарной схемы и перейти к фрезерованию, так как фрезерование позволит учесть положение заготовки относительно траектории движения инструмента.

С учетом выявленной особенности обработки кристаллов КРС-5 разработана и реализована методика обработки кристаллов методом алмазного фрезерования, состоящая из двух этапов:

1. Определение оптимальной ориентации заготовки при фрезеровании, при котором не наблюдается хрупкого разрушения;

We used diamond cutters with radius r 1 mm and 5 mm (Fig. 2) with a zero rake angle as a cutting tool in the research. A special holder has been developed for fastening diamond cutters, which is installed in the body of a single-cutter head.

The base surface of the vacuum faceplate was also machined with a diamond cutter after all the preparatory operations were completed.

TECHNOLOGY OF MACHINING KRS-5 PRODUCTS

Preliminary, the tests on machining a cylindrical KRS-5 workpiece were carried out according to a turning scheme (the workpiece rotates around its axis, the feed motion is communicated to the tool). Machining of the end face of the KRS-5 specimen showed that the crystallographic orientation affects the surface quality, since alternation of brittle fracture zones and zones where no defects were observed on the surface were visually observed on the workpiece (Fig. 3). Due to the fact that changing the machining modes did not lead to the elimination of defective zones, it was decided to abandon the turning scheme and proceed to milling, since milling will take into account the position of the workpiece relative to the tool path.

Taking into account the revealed peculiarities of machining KRS-5 crystals, a technique for machining crystals by the method of diamond milling was developed and implemented, consisting of two stages:



Рис. 3. Заготовка из КРС-5 после токарной обработки
Fig. 3. Workpiece made of KRS-5 after turning

2. Обработка заготовки с учетом правильного ориентирования.

Первый этап, на котором происходит определение оптимальной ориентации заготовки, реализован на ультра прецизионном стенде по схеме, представленной на рис. 4. Однорезцовая головка с алмазным резцом с радиусом $r=1$ мм устанавливалась на инструментальном шпинделе. Планшайба с заготовкой устанавливалась на шпинделе изделия. При обработке заготовка совершала вращательные движения вокруг своей оси. Траектория движения алмазного резца проходила через ось вращения заготовки.

Обработка выполнялась на следующих режимах: частота вращения инструментального шпинделя 500 об/мин, частота вращения заготовки 0,5 об/мин, глубина резания $t=10$ мкм. После обработки на заготовке образовывались зоны хрупкого разрушения, которые можно было обнаружить невооруженным взглядом (рис. 5). Из анализа полученной картины расположения зон хрупкого разрушения, и зная траекторию перемещения алмазного инструмента, можно сориентировать деталь в угловом положении таким образом, чтобы при обработке обеспечивался только пластичный сьем материала, без хрупкого разрушения.

Второй этап заключается в обработке правильно сориентированной детали по схеме, представленной на рис. 6. В отличие от схемы, при которой определя-

1. Determination of the optimal orientation of the workpiece during milling, in which brittle fracture is not observed;
2. Machining the workpiece taking into account the correct orientation.

The first stage, where the optimal orientation of the workpiece is determined, was implemented on an ultra-precision machine tool according to the scheme shown in Fig. 4. A single-cutter head with a diamond cutter with a radius of $r=1$ mm was installed on the tool spindle. The faceplate with the workpiece was installed on the product spindle. During machining, the workpiece made rotational movements around its axis. The path of the diamond cutter passed through the axis of rotation of the workpiece.

Machining was carried out in the following modes: tool spindle rotation frequency of 500 rpm, workpiece rotation frequency of 0.5 rpm, cutting depth $t=10$ μm . After machining, brittle fracture zones formed on the workpiece, which could be detected with the naked eye (Fig. 5). From the analysis of the obtained picture of the location of brittle fracture zones and knowing the path of the diamond tool, it is possible to orient the part in an angular position so that only plastic removal of material is provided during machining, without brittle fracture.

The second stage consists in machining a correctly oriented part according to the scheme shown in Fig. 6.

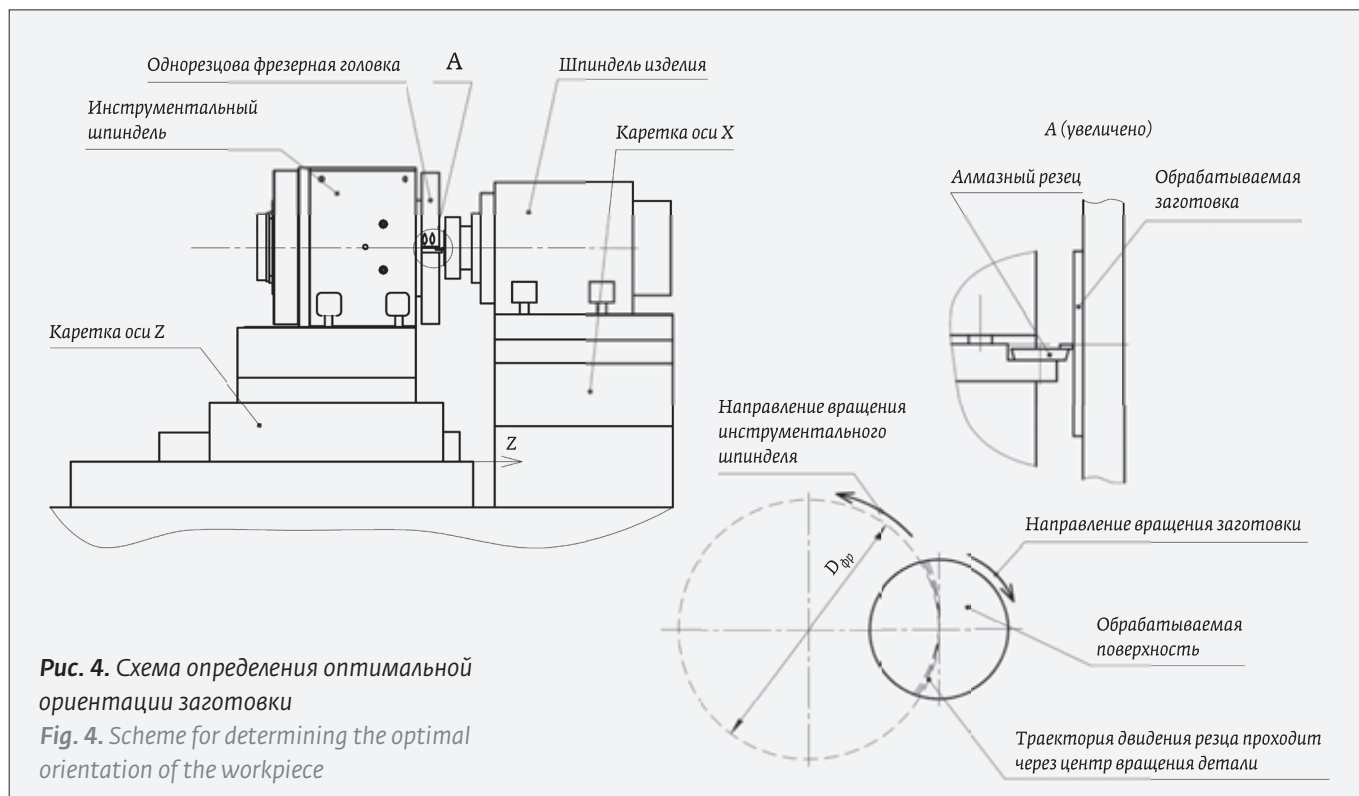


Рис. 4. Схема определения оптимальной ориентации заготовки

Fig. 4. Scheme for determining the optimal orientation of the workpiece

лось расположение хрупких зон, заготовка не совершает вращательного движения, а перемещается относительно фрезерной головки с движением подачи.

Следы хрупкого разрушения, полученные на заготовке при эксперименте, устранялись путем предварительной обработки на следующих режимах: частота вращения инструментального шпинделя 1000 об/мин, скорость подачи заготовки 12 мм/мин, глубина резания 50 мкм. Для устранения всех следов хрупкого разрушения потребовалось снять с заготовки припуск более 0,25 мм. Далее обработка выполнялась на чистовых режимах алмазным резцом с радиусом 5 мм. Чистовые режимы обработки, на которых получено наилучшее качество поверхности, следующие: частота вращения инструментального шпинделя 1000 об/мин, скорость подачи заготовки 12 мм/мин, глубина резания $t=3$ мкм.

На обработанной поверхности полностью отсутствовали следы хрупкого разрушения, что подтвердило правильность ориентации заготовки, определенной на первом этапе, а также правильность использованной методики обработки. Шероховатость поверхности, замеренная с помощью профилометра, составила $Ra 0,01$ мкм.

По разработанной методике, описанной выше, была выполнена обработка торцевых поверхностей светоделительного кольца из КРС-5, которое представляет собой кольцо с наружным диаметром 60 мм, внутренним диаметром 36 мм и толщиной 6 мм. К изделию предъявлены следующие требования точности и качества: шероховатость поверхности $Ra 0,01$ мкм, точность формы $N=0,5$, местная ошибка $\Delta N=0,2$, клиновидность менее 2-х угловых секунд. Светоделительные кольца находят свое применение в фурье-спектрометрах и в настоящее время изготавливаются из селенида цинка, недостатком которого является водорастворимость. Кристаллы КРС-5 являются влагостойкими, что поможет повысить характеристики фурье-спектрометров.

Последовательность обработки торцевых поверхностей кольца состояла из следующих этапов:

1. Черновая обработка заготовки с одной из сторон с целью устранения дефектов предварительной обработки.
2. Определение оптимальной ориентации заготовки по схеме на рис. 4.

Примеры траекторий алмазного реза при котором не наблюдается хрупкого разрушения материала

Зоны хрупкого разрушения материала

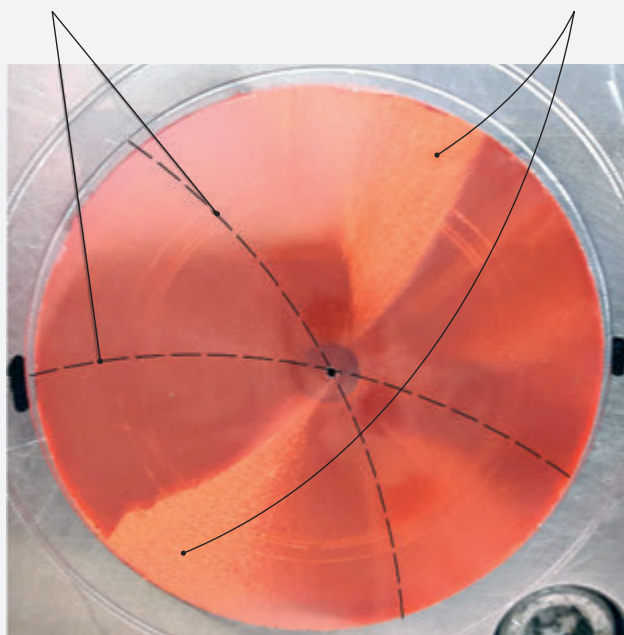


Рис. 5. Заготовки из КРС-5 после выявления оптимальной ориентации

Fig. 5. Workpieces made of KRS-5 after identifying the optimal orientation

Unlike the scheme in which the location of fragile zones was determined, the workpiece does not rotate, but moves relative to the milling head with a feed motion.

Направление вращения инструментального шпинделя

Направление подачи детали

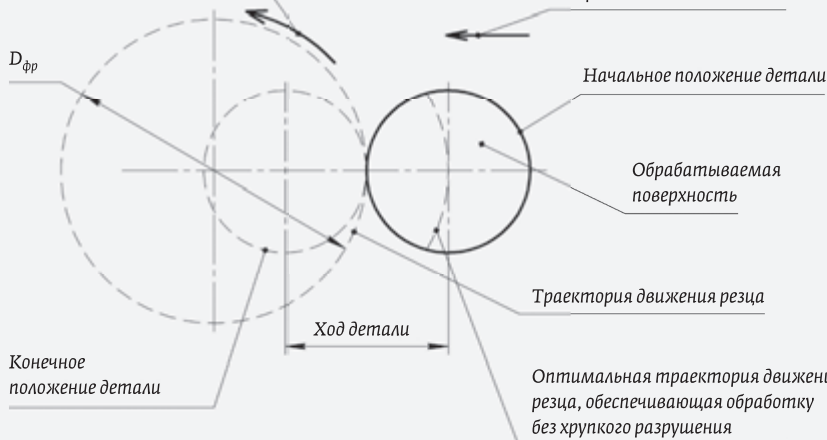


Рис. 6. Схема обработки заготовок из КРС-5 методом фрезерования

Fig. 6. Scheme of machining workpieces made of KRS-5 by milling

3. Ориентирование заготовки в оптимальное положение и черновая обработка с целью устранения следов хрупкого разрушения.
4. Обработка заготовки на чистовых режимах по схеме на рис. 6.
5. Переворот заготовки и обработка второй торцевой поверхности, повторяя пункты 1-4.
6. Переворот заготовки и чистовая обработка первой поверхности.

В зависимости от необходимой точности формы количество переверотов заготовки может быть увеличено. Это делается для устранения технологической наследственности, которая может привести к искажению формы изделия.

По описанной выше методике был обработан ряд экспериментальных образцов. Фото обработки кольца показано на рис. 7.

Метрологический контроль формы обработанных поверхностей осуществлялся на интерферометре OWI150 HP XT с объективом для плоской оптики TF 6" $\lambda/20$ Zygo Corp. Рабочая длина волны интерферометра 632,8 нм.

На рис. 8 представлен замер формы поверхности наилучшего образца. Точность формы составила $N=4,5$ (1,239 мкм), $\Delta N=2,1$ (0,678 мкм), клиновидность - 6,9 угловые секунды. Как видно из резуль-

Prior machining in the following modes eliminated traces of brittle fracture obtained on the workpiece during the test: tool spindle speed 1000 rpm, workpiece feed rate 12 mm/min, cutting depth 50 μm . To eliminate all traces of brittle fracture, it was necessary to remove an allowance of more than 0.25 mm from the workpiece. Further, the machining was carried out in finishing modes with a diamond cutter with a radius of 5 mm. Finishing modes of machining, which obtained the best surface quality, are as follows: tool spindle speed 1000 rpm, workpiece feed rate 12 mm/min, depth of cut $t=3 \mu\text{m}$.

There were no traces of brittle fracture on the treated surface, which confirmed the correct orientation of the workpiece, determined at the first stage, as well as the correctness of the machining technique used. The surface roughness measured with a profilometer was $Ra 0.01 \mu\text{m}$.

According to the developed technique described above, the end surfaces of the beam splitting ring made of KRS-5, which is a ring with an outer diameter of 60 mm, an inner diameter of 36 mm, and a thickness of 6 mm, were machined. The following accuracy and quality requirements are imposed on the product: surface roughness $Ra 0.01 \mu\text{m}$, shape accuracy $N=0.5$, local error $\Delta N=0.2$, wedging of less than 2 arc seconds. Beam-splitting rings are used in Fourier-transform spectrometers and are currently made from zinc selenide, the disadvantage of which is water solubility. KRS-5 crystals are moisture resistant, which will help improve the characteristics of Fourier spectrometers.

The sequence of machining the end surfaces of the ring consisted of the following stages:

1. Rough machining of the workpiece from one of the sides in order to eliminate defects in the preliminary machining.
2. Determination of the optimal orientation of the workpiece according to the scheme in Fig. 4
3. Orientation of the workpiece to the optimal position and roughing in order to eliminate traces of brittle fracture.
4. Machining the workpiece in finishing modes according to the scheme in Fig. 6.
5. Turning the workpiece over and machining the second end surface by repeating points 1-4.
6. Turning the workpiece over and finishing the first surface.

Depending on the required shape accuracy, the number of workpiece turns can be increased. This is done to eliminate technological heredity, which can lead to distortion of the product shape.

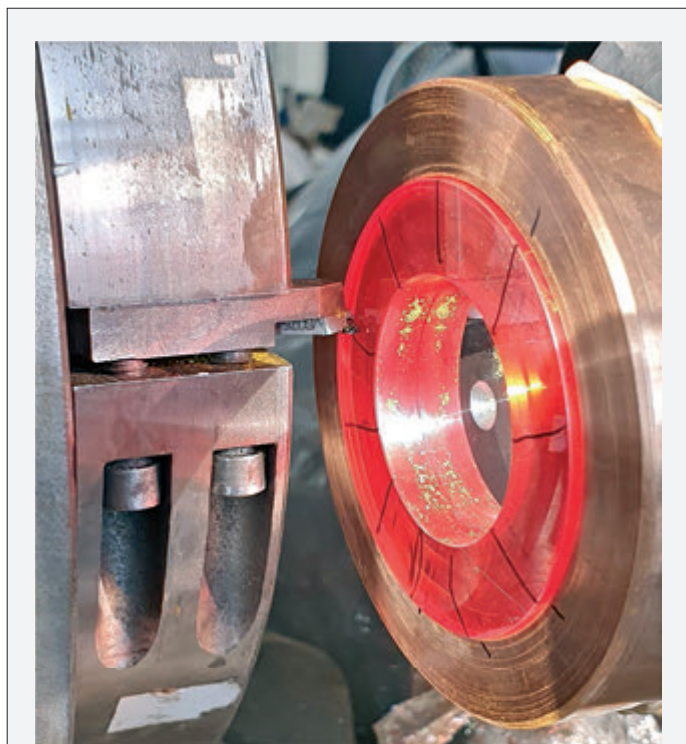


Рис. 7. Обработка кольца из KRS-5
Fig. 7. Machining a ring made of KRS-5

татов интерферограммы, обработанная заготовка имеет форму седла. Такую же форму седла имели и остальные обработанные заготовки.

С целью поиска причин образования седлообразной поверхности на стенде было обработано медное кольцо с размерами, совпадающими с размерами кольца из КРС-5. Режимы и схема обработки были такими же, как при обработке кристаллов, за исключением необходимости выявления правильной ориентации заготовки. Исследование по обработке медных колец показало отсутствие видимой седлообразности заготовок, а также значительное улучшение точности формы по сравнению с обработкой кристаллов, $N=1,47$ против $N=4,5$.

Требуемая точность формы кольца не может быть обеспечена на стенде из-за его конструктивных особенностей: низкая жесткость, отсутствие механизма точной юстировки оси шпинделя изделия в вертикальной плоскости.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволили понять особенности обработки и физику процесса резания кристаллов КРС-5, при этом удалось выяснить, что точность формы связана с анизотропией кристаллов КРС-5 и изменением твердости в различных направлениях, а также неодинаковостью условий резания, так как заготовка имеет круглую форму.

Эксперименты, проведенные на светодетельных кольцах из КРС-5, позволили отработать технологию обработки, а также подобрать оптимальные режимы резания. Достигнутые параметры точности и качества ($N=4,5$; $Ra=0,01$ мкм) поверхности являются достаточными для стандартных оптических изделий (например линзы и окна). Однако современные оптические приборы предъявляют более высокие требования к качеству и точности оптических поверхностей.

Для повышения точности и качества обработки требуется:

- повышение жесткости основных узлов станка (позволит устранить влияние анизотропии кристаллов на качество обрабатываемых поверхностей);
- использовать встроенные механизмы выставления узлов станка (позволят устранить откло-

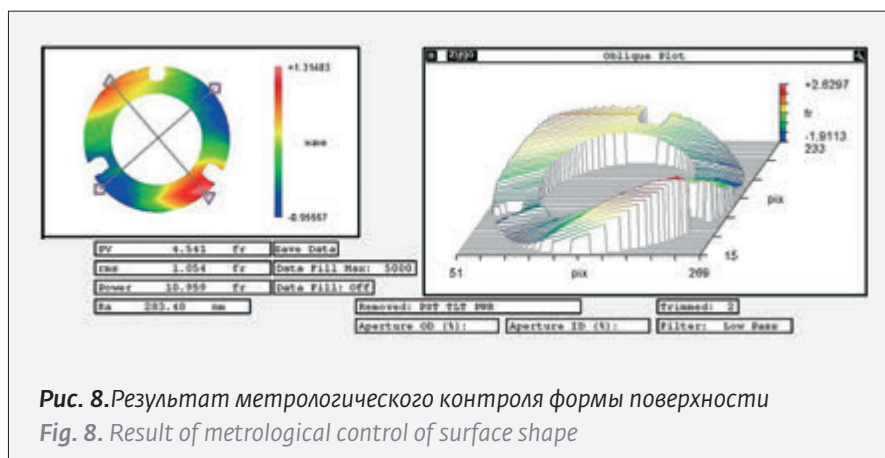


Рис. 8. Результат метрологического контроля формы поверхности
Fig. 8. Result of metrological control of surface shape

A number of test samples were machined by the method described above. A photo of the ring machining is shown in Fig. 7.

Metrological control of the shape of the treated surfaces was carried out on an OWI150 HP XT interferometer with a TF 6" $\lambda/20$ Zygo Corp flat optics objective lens by Zygo Corp. The working wavelength of the interferometer is 632.8 nm.

Fig. 8 shows the measurement of the surface shape of the best sample. The shape accuracy was $N=4.5$ ($1.239 \mu\text{m}$), $\Delta N=2.1$ ($0.678 \mu\text{m}$), the wedging was 6.9 arc seconds. As can be seen from the results of the interferogram, the machined workpiece has the shape of a saddle. The rest of the machined blanks had the same saddle shape.

In order to search for the reasons for the formation of a saddle-shaped surface, a copper ring with dimensions matching the dimensions of a ring made of KRS-5 was machined on the machine tool. The modes and scheme of machining were the same as when machining crystals, with the exception of the need to identify the correct orientation of the workpiece. Research on the machining of copper rings showed no apparent saddle-like shape of the workpieces, as well as a significant improvement in shape accuracy compared to crystal machining, $N=1.47$ versus $N=4.5$.

The required accuracy of the ring shape cannot be ensured on the machine tool due to its design features: low rigidity, lack of a mechanism for precise alignment of the product spindle axis in the vertical plane.

CONCLUSIONS

The studies carried out made it possible to understand the features of machining and the physics of the cutting of KRS-5 crystals, while it was possible to find out that the shape accuracy is associated with the anisotropy of the KRS-5 crystals and the change in hardness

**Система
прецизионной
лазерной резки
RX-150**

с применением технологий
IPG Photonics

**Высокая точность,
толщина реза от 30 мкм**

**Широкий диапазон
обрабатываемых
материалов
толщиной от 30 мкм**

**Области применения:
микроэлектроника, резка
керамических подложек,
стендов, щелевых масок и др.**

ООО «Лазерный Центр»
195067 г. Санкт-Петербург,
ул. Маршала Тухачевского,
д.22, БЦ «Сова», оф.228
тел.: (812) 240-50-60,
info@newlaser.ru
www.newlaser.ru



нение от перпендикулярности оси шпинделя к плоскости обрабатываемой детали, а также устранить причины вызывающие клиновидность заготовки);

- контролировать форму заготовки без снятия ее со станка для коррекции траектории движения суппортов на чистовом проходе с помощью специальной функции, заложенной в ЧПУ (позволит повысить точность обрабатываемых изделий).

Предлагаемый способ обработки кристаллов КРС-5 позволит повысить производительность изготовления оптических изделий с обеспечением необходимой точности и качества. Изготовлением ультрапрецизионных станков под подобные задачи в РФ занимается ООО «НПП Станкостроительный завод «Туламаш».

REFERENCES

1. Darvoit T. I., Karlova E. K., Karlov N. V. Investigation of some properties of KRS crystals in the 10-micron spectral range. *Quantum electronics*. 1975; 2 (4): 765–772. Дарвоит Т. И., Карлова Е. К., Карлов Н. В. Исследование некоторых свойств кристаллов КРС в 10-микронной области спектра. *Квантовая электроника*. 1975; 2 (4): 765–772.
2. Kuznetsov M. S., Kiseleva K. S., Lisitskiy I. S. Influence of growing medium on the TlBr crystals characteristics. Part 1. The spectral transmission and diffusion light. *Non-ferrous metals*. 2011; 4: 81–84. [In Russ]. Кузнецов М. С., Киселева К. С., Лисицкий И. С. Влияние атмосферы выращивания на характеристики кристаллов TlBr Часть 1. Спектральное пропускание и светорассеяние. *Цветные металлы*. 2011; 4: 81–84.
3. Lisitskiy I. S., Kuznetsov M. S., Zaramenskikh K. S., Golovanov V. F., Polyakova G. V. Research of the influence of the processing in hydrostat with high pressure and increased temperature on optical and laser characteristics of thallium halide crystals. *Non-ferrous metals*. 2012; 11: 67–71. [In Russ]. Лисицкий И. С., Кузнецов М. С., Зараменских К. С., Голованов В. Ф., Полякова Г. В. Исследование влияния обработки в гидростате при высоком давлении и повышенной температуре на оптические и лазерные характеристики кристаллов галогенидов таллия. *Цветные металлы*. 2012; 11: 67–71.

CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ABOUT AUTHORS

- Лапшин В. В., корреспондирующий автор, lapshin_v@cnc-tulamash.ru, ООО «Научно-производственное предприятие Станкостроительный завод «Туламаш»; <https://cnc-tulamash.ru>; Тула, Россия. ORCID: 0000-0002-6971-8534
- Захаревич Е. М., ООО «Научно-производственное предприятие Станкостроительный завод «Туламаш», <https://cnc-tulamash.ru>, Тула, Россия. ORCID: 0000-0001-6997-3335
- Кузнецов М. С., АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»; <https://giredmet.inni.info>; Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-8441-4424
- Зараменских К. С., АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет»; <https://giredmet.inni.info>; Москва, Россия. ORCID: 0000-0001-8573-3470
- Осипов А. В., ООО «Научно-производственная компания «МакроОптика»; <https://macrooptica.ru>; Москва, Россия. ORCID: 0000-0002-8847-9428

in different directions, as well as the unequal cutting conditions, since the workpiece has a round shape.

The tests carried out on beam-splitting rings made of KRS-5 made it possible to work out the machining technology, as well as select the optimal cutting conditions. The achieved parameters of accuracy and quality ($N=4.5$, $Ra=0.01 \mu\text{m}$) of the surface are sufficient for standard optical products (for example, lenses and windows). However, modern optical instruments place higher demands on the quality and accuracy of optical surfaces.

To improve the accuracy and quality of machining, one will need to:

- increase the rigidity of the main units of the machine (will eliminate the effect of crystal anisotropy on the quality of the machined surfaces);
- use the built-in mechanisms for setting the machine units (they will eliminate the deviation from the perpendicularity of the spindle axis to the plane of the workpiece, as well as eliminate the reasons causing the wedging of a workpiece);
- control the shape of the workpiece without removing it from the machine, to correct the path of movement of the supports on the finishing pass using a special function embedded in the CNC (will improve the accuracy of the machined products).

The proposed method for machining crystals KRS-5 will increase the productivity of manufacturing optical products while ensuring the required accuracy and quality. The manufacture of ultra-precision machine tools for similar tasks in the Russian Federation is carried out by Research and Production Enterprise Machine-Tool Plant “Tulamash”, LLC.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest.

AUTHORS

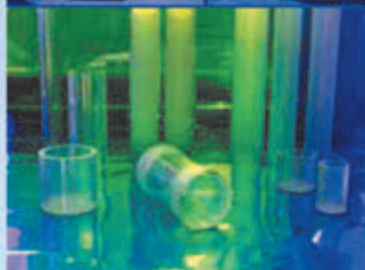
- Lapshin V. V., corresponding author, lapshin_v@cnc-tulamash.ru, Research and Production Enterprise Machine-Tool Plant “Tulamash”, LLC. Tula, Russia. <https://cnc-tulamash.ru>. ORCID: 0000-0002-6971-8534
- Zakharevich E. M., Research and Production Enterprise Machine-Tool Plant “Tulamash”, LLC; <https://cnc-tulamash.ru>; Tula, Russia. ORCID: 0000-0001-6997-3335
- Kuznetsov M. S., State Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, JSC; <https://giredmet.inni.info>; Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-8441-4424
- Zaramenskikh K. S., State Research and Design Institute of Rare Metal Industry “Giredmet”, JSC; <https://giredmet.inni.info>; Moscow, Russia. ORCID: 0000-0001-8573-3470
- Osipov A. V., Research and Production Company “MacroOptics”, LLC; <https://macrooptica.ru>; Moscow, Russia. ORCID: 0000-0002-8847-9428

Синтетический САПФИР

Производство кристаллов и оборудования



Пластины, окна, подложки:
смотровые, защитные, сканерные окна, часовые
стекла, экраны для смартфонов и мобильных
телефонов, оптические компоненты



Трубы и тигли
трубки и тигли различной длины и сечения
для ламп высокого давления, термореакторов,
установок плазменного травления



Стержни круглого и
прямоугольного сечения:
световоды для пирометров, плунжера для
хроматографических насосов и сиквенаторов,
изоляторы, износостойкие направляющие



Индивидуальный заказ:
Термореакторы, часовые и приборные камни,
подшипники, компоненты для научной и
медицинской техники, брекеты, сувенирная
продукция



Оборудование для выращивания
кристаллов

Nika-M60, Nika-M30, Nika-3, Nika-PROFILE



ЗАО «РОСТОКС-Н»

Since 1993

142432 Россия, Московская обл., г. Черноголовка, Проспект Академика Семенова, д. 9, ЗАО «Ростокс-Н»
Тел.: +7 496 527 35 91, +7 496 527 35 96, +7 496 527 35 95 • Факс: +7 496 527 36 03
E-mail: belov@ezan.ac.ru, info@rostox-n.ru • <http://www.rostox-n.ru>