

УДК 621.9

Обеспечение качества поверхности анизотропных кристаллов за счет применения осциллирующих движений

А.Е. Образцов¹, В.М. Утенков¹, П.М. Кузнецов²

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Ensuring the surface quality of anisotropic crystals by applying oscillating movements

A.E. Obraztsov¹, V.M. Utenkov¹, P.M. Kuznetsov²

¹ Bauman Moscow State Technical University

² Moscow Aviation Institute (National Research University)

Вследствие хрупкости и неоднородных свойств анизотропный кристалл является сложным материалом для обработки, в том числе и монокристалл KDP, применяемый как нелинейно-оптический элемент в сверхмощных лазерах. Выполнен анализ основных высокоточных методов, используемых для обработки монокристалла KDP: шлифования, микроточения и магнитореологической финишной обработки (полировки). Показано, что микроточение с применением осциллирующих движений режущей кромки инструмента позволяет улучшить производительность, повысить качество обработки и получить требуемую поверхность. Приведены примеры работ, где отмечена нецелесообразность использования шлифования из-за получаемых дефектов, ограничения микроточения для обеспечения низкой шероховатости, а также возникающие сложности магнитореологической финишной обработки. По результатам анализа на основе эмпирических данных предложено техническое решение в виде применения осциллирующих движений режущего инструмента, позволяющее расширить возможности традиционной обработки и повысить допустимую глубину резания при сохранении качества получаемой поверхности.

EDN: KKVCPP, <https://elibrary/kkvcpp>

Ключевые слова: монокристалл KDP, применение осциллирующих движений, вибрационное резание, магнитореологическая финишная обработка

Anisotropic crystal is a difficult material to process due to its fragility and heterogeneous properties. A striking example is the KDP single crystal, which is used as a nonlinear optical element in heavy-duty lasers. This article provides an analysis of the main high-precision machining methods, namely: grinding, micro-sharpening, magnetorheological finishing (polishing). Cutting using oscillating movements is considered as an addition that allows to improve productivity, improve the quality of processing and ensure that the desired surface is obtained. The article provides examples of work that indicate the impracticability of using grinding due to the resulting defects. Limitations of micro-sharpening to ensure low roughness, as well as the emerging difficulties of magnetorheological finishing. As a result of the analysis based on empirical data, a reasonable solution was proposed in the form of the use of oscillating movements of the cutting tool, since this method allows to expand the possibilities of traditional processing, increasing the permissible cutting depth at times without losing the quality of the resulting surface.

EDN: KKVCP, <https://elibrary/kkvcp>

Keywords: KDP single crystal, using oscillating movements, vibration cutting, magnetorheological finishing

Благодаря хорошим нелинейно-оптическим свойствам и высокому порогу повреждения лазером кристалл дигидрофосфата калия (KDP) широко применяется для генерации гармоник, электрооптической коммутации, инфракрасных оптических параметрических генераторов, интегральных оптических волноводов и т. д.

В частности, крупногабаритный кристалл KDP может выступать в качестве нелинейного преобразователя частоты второй и третьей гармоник ячеек Поккельса в термоядерном синтезе [1–5]. Преобразователь частоты, состоящий из плоскости утроения частоты кристалла KDP, способен преобразовывать инфракрасный лазерный луч в ультрафиолетовый, который необходим для повышения эффективности преобразования энергии [6].

Для обработки кристалла KDP применяют как традиционные методы (точение, шлифование), так и новые, к которым можно отнести резание с осциллирующими движениями режущего инструмента (так называемое вибрационное резание).

Цель работы — сравнительный анализ методов прецизионной обработки хрупких оптических материалов и определение рационального способа обработки, обеспечивающего высокое качество поверхности при повышенной производительности.

Шлифование. В работе [7] описана обработка кристалла KDP на сверхточном шлифовальном станке VG401MK II с использованием алмазного шлифовального круга зернистостью Р600. Для анализа результатов обработки поверхности образца, использован оптический микроскоп OLYMPUS MX40. Как видно из рис. 1, следы шлифования присутствуют как в центре, так и по краям [7].

Так как кристалл KDP обладает мягкостью и хрупкостью, неравномерный размер зерен шлифовального круга и наличие абразивных частиц между ним и кристаллом приводят к повреждению поверхности в виде царапин и трещин [8].

Также выявлено влияние подачи на качество поверхности (рис. 2).

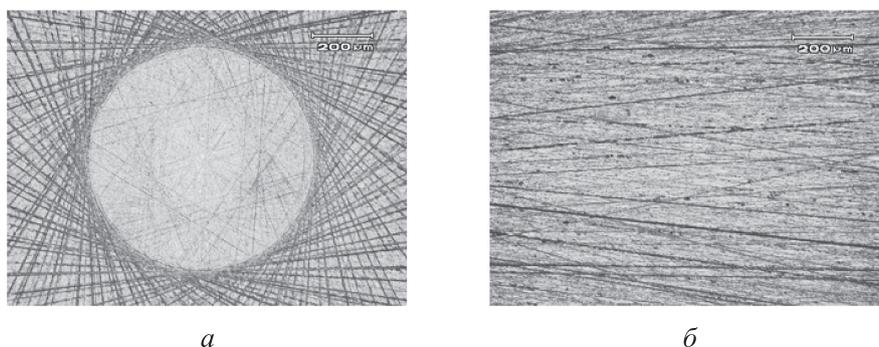


Рис. 1. Структура поверхности кристалла KDP после обработки шлифовальным кругом зернистостью Р600 со следами шлифования в центре (а) и по краям (б)

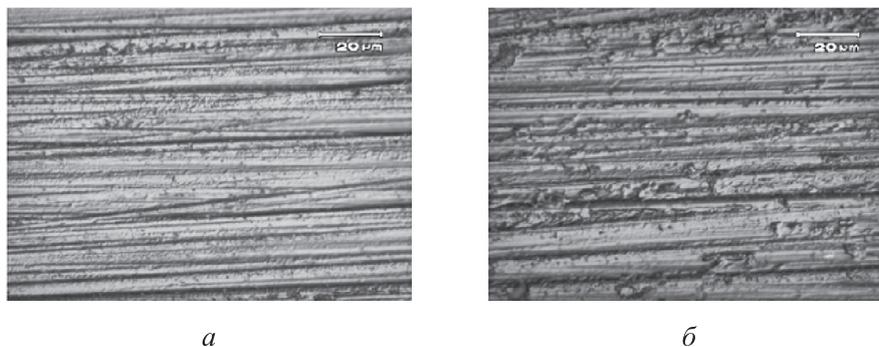


Рис. 2. Структура поверхности кристалла KDP после обработки шлифовальным кругом зернистостью Р600 с подачей $S = 10$ (а) и 40 мкм/мин (б)

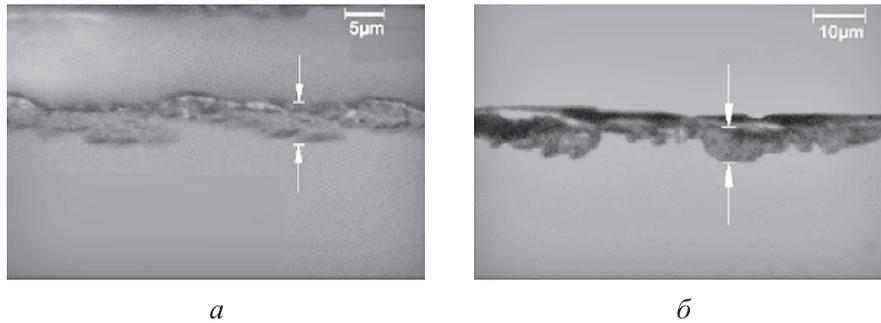


Рис. 3. Результаты обработки подповерхностных повреждений шлифовальным кругом зернистостью Р600 с подачей $S = 10$ (а) и 40 мкм/мин (б) после травления

Для определения глубины подповерхностного повреждения и формы трещин выполнены поперечный разрез и травление. Для полировки использована полирующая жидкость, представляющая собой смесь спирта и частиц SiO размером 7...20 нм. Полировальная подушечка была из кожи, частота вращения полировальной пластины составляла 60 мин^{-1} , давление — 0,33 Н [9].

Плоскость кристаллической решетки определяет свойства KDP и способность сопротивляться развитию и распространению подповерхностных микротрещин. Так как кристалл KDP обладает сильной анизотропией, модули упругости при сдвиге на разных плоскостях кристалла будут различаться, а следовательно, и усилия, необходимые для образования трещины [10]. По результатам эксперимента установлено, что глубина подповерхностного повреждения кристалла KDP, обработанного шлифовальным кругом, невелика, а микротрещины распределены и распространяются в одном направлении. При подаче шлифовального круга

$S = 10$ мкм/мин максимальное подповерхностное повреждение составило 7,41 мкм, при $S = 40$ мкм/мин — 12,96 мкм.

Микроточение. Одноточечная алмазная токарная обработка — самый популярный метод точения кристаллов KDP диаметром до 150 мм [11].

В первой исследовательской работе по точению кристаллов KDP [12] описаны пошаговый процесс алмазной токарной обработки KDP, геометрические характеристики режущего инструмента, острота кромок и смазочно-охлаждающая жидкость, а также подготовка кристаллов к обработке, очистка и контроль для достижения пластичного режима обработки кристаллов KDP.

В статье [13] приведены результаты экспериментов по обработке кристаллов KDP на сверхточном токарном станке Toshiba с точностью позиционирования 10 нм. Выявлено влияние кристаллографической ориентации кристалла и глубины резания на качество получае-

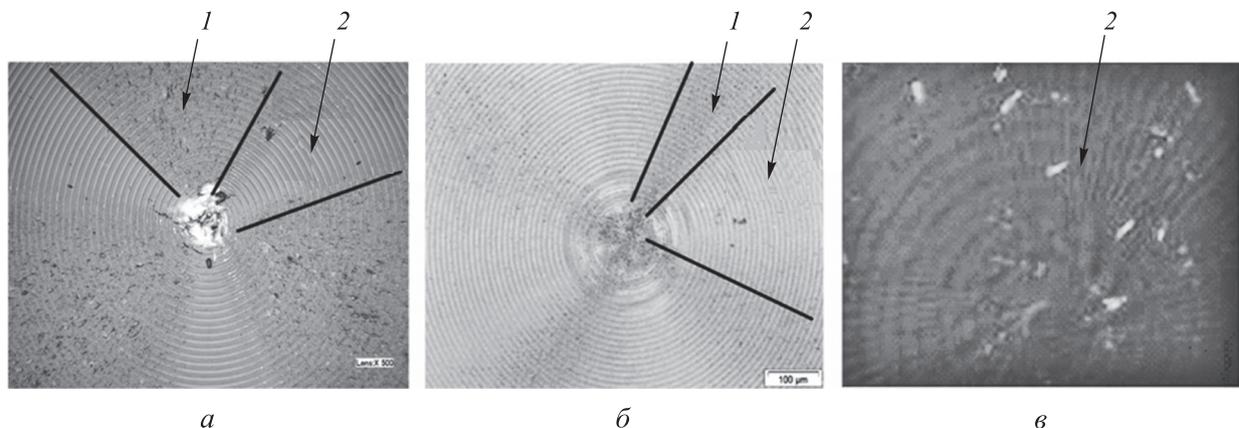


Рис. 4. Результаты обработки поверхности кристалла KDP на сверхточном токарном станке Toshiba при глубине резания $t = 1,40$ (а), 0,50 (б) и 0,03 мкм (в): 1 — хрупкое разрушение; 2 — пластичный режим обработки

мой поверхности. Результаты обработки поверхности при глубине резания $t = 1,40; 0,50$ и $0,03$ мкм приведены на рис. 4, *a–в*.

При глубине резания $t = 1,40$ мкм (см. рис. 4, *a*) в области хрупкого разрушения наблюдается множество точечных повреждений, трещин и сколов. После уменьшения глубины резания до $t = 0,50$ мкм (см. рис. 4, *b*) качество поверхности повышается, однако дефекты полностью не уходят. При глубине резания $t = 0,03$ мкм (см. рис. 4, *в*) происходит пластичный режим обработки по всей поверхности. Качество поверхностного слоя значительно улучшается, и он во всех направлениях линии кристалла становится гладким (без каких-либо микротрещин).

Содержание материала, удаленного в режиме пластичного резания, для кристаллов KDP плоскости (001) зависит не только от глубины резания, но и их кристаллографической ориентации (рис. 5).

При глубине резания $t = 0,03$ мкм получена поверхность с однородной текстурой и параметром шероховатости $Ra = 2,689$ нм.

Магнитореологическая финишная обработка (МФО). МФО — передовой метод полировки с использованием магниточувствительных порошков карбонильного железа и немагнитного абразива, растворенных в жидкой среде. Выбор абразива зависит как от физических свойств обрабатываемой детали (твердости и др.), так и от химических (например, от химической стойкости). По мнению специалистов, это лучший детерминированный процесс доводки оптики до высокой точности с небольшим количеством

подповерхностных дефектов [14]. В типичном процессе МФО жидкость поступает через сопло на вращающееся колесо с сильным магнитным полем, а лента натягивается при приближении к обрабатываемой детали. Скорость удаления определяется параметрами процесса, а также свойствами материала, жидкости и заготовки [15].

Установлено [16], что неводная магнитореологическая жидкость, состоящая из порошка карбонильного железа, наноалмазов и сложного эфира дикарбоновой кислоты, может успешно отполировать ранее обработанный алмазом кристалл KDP, удалив все токарные канавки без ухудшения шероховатости.

В работе [17] показано, что после МФО качество гладкой поверхности, по-прежнему не соответствовало техническим требованиям, и для достижения более высокого уровня изготовления требуется множество исследований. Во-первых, в жидкости содержатся, по меньшей мере, два вида частиц (порошок карбонильного железа и абразивы), что усложняет ее приготовление. Во-вторых, размер порошка карбонильного железа составляет $0,5...3,0$ мкм, что намного больше, чем у наноразмерных абразивов. Так как порошок карбонильного железа неизбежно участвует в удалении материала во время МФО, наличие крупных частиц, очевидно, привело бы к появлению царапин и препятствовало бы улучшению качества отделки [18]. В-третьих, показано [19], что мягкий абразив и кремнеземистый абразив с низкой скоростью удаления могут обеспечить лучшую шероховатость поверхности в МФО из мягкого ZnS.

Fe_3O_4 — распространенный магнитный материал, который в последние годы широко исследовался благодаря свойствам и потенциальному применению в различных областях, таких как феррожидкости, катализаторы, цветные пигменты и поглотители микроволнового излучения [20]. Кроме того, размер частиц можно точно регулировать от нано- до микрометра. Они также могут быть легко диспергированы (распределены) поверхностно-активным веществом путем перестройки поверхности вследствие его химической активации [21]. Таким образом, малый разброс частиц по размерам, низкая твердость и слабые магнитные частицы с низкой скоростью удаления благоприятны для обработки сверхточной поверхности.

Обычная магнитореологическая жидкость состоит из основной жидкости, функциональ-

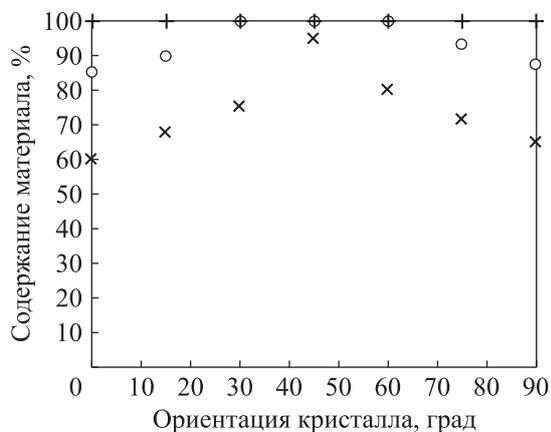


Рис. 5. Зависимости содержания материала, удаленного в режиме пластичного резания, для KDP от кристаллографической ориентации кристалла при глубине резания $t = 0,03$ (x), $0,50$ (o) и $1,40$ мкм (+)

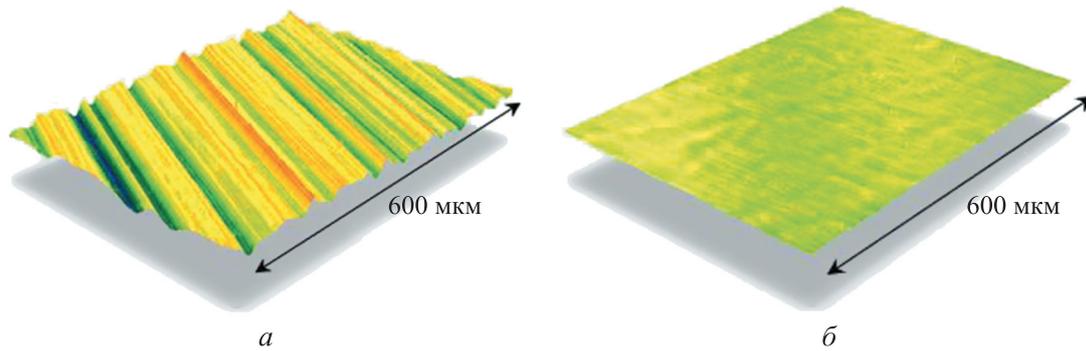


Рис. 6. Интерферограммы, полученные при микрофазовом измерении поверхности KDP в белом свете:
 а — поверхность KDP после микроточения со среднеквадратичной микрошероховатостью 27 нм до МФО;
 б — отполированная методом МФО поверхность KDP со среднеквадратичной микрошероховатостью 0,65 нм

ных частиц (стружки и абразивов или Fe_3O_4) и некоторых добавок. Диспергирование частиц во избежание образования царапин при чистой обработке достигнуто эмульгированием с высокой скоростью сдвига и ультразвукового дробления.

Репрезентативные интерферограммы поверхности KDP, иллюстрирующие эффект полировки МФО с оптимизированным содержанием жидкости-носителя, показаны на рис. 6.

Для успешной полировки поверхностей кристаллов KDP методом МФО требуются специально подобранные неводные жидкости, совместимые как с магнитно-активной средой, так и с физическими и химическими свойствами, присущими KDP. Совместимые неводные жидкости-носители, составляющие основу, должны быть способны удерживать растворенный KDP, чтобы микростружка, удаляемая с поверхности кристалла во время полировки, не попадала обратно на поверхность.

В жидкости необходимо использовать соответствующие стабилизаторы, чтобы защитить карбонильное железо и кристалл KDP от реакций, приводящих к ее нестабильности и слипанию частиц, что вызывает ухудшение качества поверхности из-за таких дефектов, как царапины и канавки. Кислотность жидкости должна поддерживаться в пределах 6,5...9,0 с целью исключения окисления поверхности, слипания частиц и неконтролируемого растворения KDP в результате кислотно-щелочной реакции.

Характеристики неводной жидкости можно оптимизировать для получения микрошероховатости на уровне половины ангстрема на поверхности KDP, регулируя содержание жидкости-носителя. Испытания на образцах кристаллов KDP размером 50×50 мм, показали улучшение качества поверхности. Таким обра-

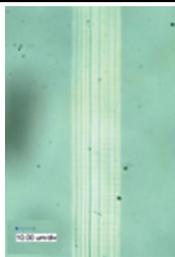
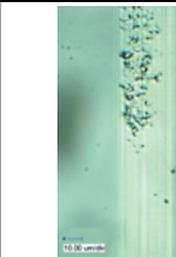
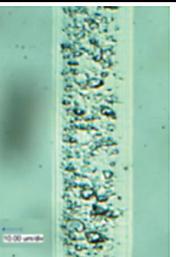
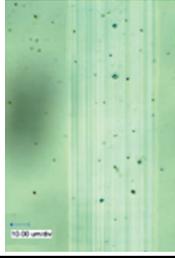
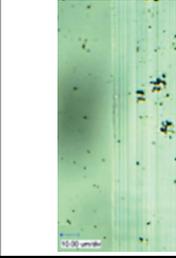
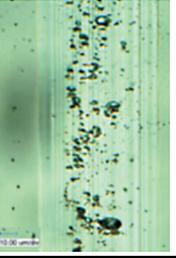
зом, полировку методом МФО можно успешно применять для финишной обработки кристаллов KDP, однако ее производительность является низкой.

Обработка с применением осциллирующих движений режущей кромки инструмента. Этот метод основан на возбуждении механических колебаний заданной частоты режущего инструмента для обработки хрупких материалов: стекла, керамики, кварца, сапфира, композитов и др. Такая технология минимизирует механические напряжения и предотвращает растрескивание, что делает ее особенно эффективной при обработке хрупких материалов.

В работе [22] рассмотрена обработка монокристаллического кремния микроточением традиционным способом и с применением осциллирующих движений режущей кромки. Полученные экспериментальным путем при скорости резания $v = 0,4$ м/мин критические значения глубины резания после традиционной обработки и микроточения с применением осциллированных движений режущей кромки составили 0,20 и 0,45 мкм соответственно. Результаты микроточения канавки разными методами при скорости резания $v = 0,4$ м/мин приведены в таблице.

Как следует из таблицы, при микроточении монокристаллического кремния с применением осциллирующих движений режущей кромки точка перехода из пластичного состояния в хрупкое соответствует гораздо большей глубине резания, а в области хрупкого перехода трещин намного меньше, чем при традиционном микроточении. Трещины можно обнаружить только в центре канавки, где находится наибольшая толщина недеформированной стружки.

Результаты микроточения канавки разными методами при скорости резания $v = 0,4$ м/мин

Метод обработки	Квазипластичное резание	Переходный процесс	Хрупкое разрушение
Традиционное микроточение			
Микроточение с применением осциллирующих движений режущей кромки			

Так как изначально осциллирующие движения применяли для инициирования и облегчения хрупкого разрушения за счет ударной силы вибрации, данный метод не рассматривали для обработки хрупких кристаллов [23]. Однако некоторые эксперименты все же были проведены и показали, что сила удара не приводит к хрупкому разрушению при мгновенном (недолгом) воздействии режущей кромки инструмента на поверхность.

Выводы

1. Особенности хрупких материалов ограничивают применение многих технологических операций вследствие зарождения и развития трещин. Применение шлифования затруднено для получения качественной обработки монокристалла KDP, так как оставляет борозды и трещиноватый слой. Микроточение позволяет получить хорошее качество поверхности при сверхмалой глубине резания, однако для дости-

жения стабильного режима пластичного резания требуется не только сверхточное перемещение, но и жесткая механическая часть станка. Обработка методом МФО обеспечивает сверхвысокую точность, наилучшую шероховатость, но припуск на обработку для получения такого качества весьма мал. Кроме того, такая обработка трудоемкая, продолжительная по времени (толщина удаляемого слоя 0,1...0,5 мкм/мин) и требует постоянного контроля рабочего процесса.

2. Совершенствование микроточения применением осциллирующих движений режущей кромки позволяет не только повысить качество получаемой поверхности и обеспечить требуемые параметры, но и увеличить производительность рабочего процесса. Если при традиционном микроточении режим пластического резания достигается при глубине резания 0,20 мкм, то при обработке с применением осциллирующих движений — при 0,45 мкм.

Литература

- [1] Fedder R.H., Robey H., Biesiada T. et al. Rapid growth of very large KDP and KD*P crystals in support of the national ignition facility. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4102, pp. 138–152, doi: <https://doi.org/10.1117/12.405280>
- [2] Wang B.L., Gao H. Experimental study on KDP crystal polishing. *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6722, pp. 67–91, doi: <https://doi.org/10.1117/12.782683>
- [3] Fedder H., Geraghty P., Locke S. et al. NIF Pockels cell and frequency conversion crystals. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5341, pp. 121–140, doi: <https://doi.org/10.1117/12.538482>
- [4] Xu Q., Wang J., Li W. et al. Defects of KDP crystal fabricated by single point diamond turning. *Proc. SPIE*, 1999, no. 3862, pp. 23–46, doi: <https://doi.org/10.1117/12.361131>

- [5] Lu G.W., Sun X. Raman study of lattice vibration modes and growth mechanism of KDP single crystals. *Cryst. Res. Technol.*, 2002, vol. 37, no. 1, pp. 93–99, doi: [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200202\)37:1%3C93::AID-CRAT93%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:1%3C93::AID-CRAT93%3E3.0.CO;2-3)
- [6] Fan D.Y., He X.T. Inertial fusion energy and laser divers. *Exploration of Nature*, 1999, vol. 18, pp. 31–37.
- [7] Zhang X., Yang C. Sub-surface damage of ultra-thin monocrystalline silicon wafer induced by dry polishing. *Electron. Mater. Lett.*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 355–362, doi: <https://doi.org/10.1007/s13391-020-00226-z>
- [8] Wu D.J., Cao X.S., Gao H. et al. Surface damage analyse of KDP crystal grinding. *Adv. Mat. Res.*, 2007, vol. 24–25, pp. 349–354, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.24-25.349>
- [9] Wu D.J., Wang B. Influence of grinding to the surface and subsurface quality of KDP crystal. *Adv. Mat. Res.*, 2008, vol. 53–54, pp. 203–208, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.203>
- [10] Wu D.J., Cao X.S., Wang Q.G. et al. Damage detection and analysis of machined KDP crystal subsurface. *Optics and Precision Engineering*, 2007, vol. 15, no. 11, pp. 1721–1726.
- [11] Kozłowski M.R., Thomas L., Edwards M. Influence of diamond turning and surface cleaning processes on the degradation of KDP crystal surfaces. *Proc. SPIE*, 1991, no. 1561, pp. 50–64, doi: <https://doi.org/10.1117/12.50764>
- [12] Fuchs B.A., Hed P.P., Baker P.C. Fine diamond turning of KDP crystals. *Appl. Opt.*, 1986, vol. 25, no. 11, pp. 1733–1735, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.25.001733>
- [13] Namba Y., Kataqirl M., Nakatsuka M. Single point diamond turning of KDP inorganic non-linear optical crystals for laser fusion. *JSPE*, 1998, vol. 64, no. 10, pp. 1487–1491, doi: <https://doi.org/10.2493/jjspe.64.1487>
- [14] Jacobs S.D. Manipulating mechanics and chemistry in precision optics finishing. *Sci. Technol. Adv. Mat.*, 2007, vol. 8, no. 3, pp. 153–157, doi: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2006.12.002>
- [15] Miao C., Shen R., Wang M. Et al. Rheology of aqueous magnetorheological fluid using dual oxide-coated carbonyl iron particles. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2011, vol. 94, no. 8, pp. 2386–2392, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04423.x>
- [16] Beier M., Scheiding S., Gebhardt A. Et al. Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with magnetorheological finishing (MRF). *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8884, art. 88840S, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2035986>
- [17] Wang C., Li X.Y., Ji F. The particle behavior analysis and design in the improvement of KDP finishing. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9532, art. 95321Z, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2186005>
- [18] Jacobs S.D., Arrasmith S.R. Development of new magnetorheological fluids for polishing CaF₂ and KDP. *LLE Review*, 1999, vol. 80, pp. 213–219.
- [19] Peng X.Q., Jiao F.F. Novel magnetorheological figuring of KDP crystal. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, vol. 9, no. 10, pp. 10–22.
- [20] Cao Y.H., Li C. Magnetically separable Fe₃O₄/AgBr hybrid materials: highly efficient photocatalytic activity and good stability. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, vol. 10, art. 251, doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0952-x>
- [21] Rumpf K., Granitzer P. Magnetic interactions between metal nanostructures within porous silicon. *Nanoscale Res. Lett.*, 2014, no. 9, art. 412, doi: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-412>
- [22] Zhang X. A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013, no. 69, pp. 57–66, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.03.006>
- [23] Moriwaki T., Shamoto E., Inoue K. Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. *CIRP Annals*, 1992, vol. 41, no. 1, pp. 141–144, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61171-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61171-8)

References

- [1] Fedder R.H., Robey H., Biesiada T. et al. Rapid growth of very large KDP and KD*P crystals in support of the national ignition facility. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4102, pp. 138–152, doi: <https://doi.org/10.1117/12.405280>
- [2] Wang B.L., Gao H. Experimental study on KDP crystal polishing. *Proc. SPIE*, 2007, vol. 6722, pp. 67–91, doi: <https://doi.org/10.1117/12.782683>
- [3] Fedder H., Geraghty P., Locke S. et al. NIF Pockels cell and frequency conversion crystals. *Proc. SPIE*, 2004, vol. 5341, pp. 121–140, doi: <https://doi.org/10.1117/12.538482>
- [4] Xu Q., Wang J., Li W. et al. Defects of KDP crystal fabricated by single point diamond turning. *Proc. SPIE*, 1999, no. 3862, pp. 23–46, doi: <https://doi.org/10.1117/12.361131>
- [5] Lu G.W., Sun X. Raman study of lattice vibration modes and growth mechanism of KDP single crystals. *Cryst. Res. Technol.*, 2002, vol. 37, no. 1, pp. 93–99, doi: [https://doi.org/10.1002/1521-4079\(200202\)37:1%3C93::AID-CRAT93%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:1%3C93::AID-CRAT93%3E3.0.CO;2-3)
- [6] Fan D.Y., He X.T. Inertial fusion energy and laser divers. *Exploration of Nature*, 1999, vol. 18, pp. 31–37.
- [7] Zhang X., Yang C. Sub-surface damage of ultra-thin monocrystalline silicon wafer induced by dry polishing. *Electron. Mater. Lett.*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 355–362, doi: <https://doi.org/10.1007/s13391-020-00226-z>
- [8] Wu D.J., Cao X.S., Gao H. et al. Surface damage analyse of KDP crystal grinding. *Adv. Mat. Res.*, 2007, vol. 24–25, pp. 349–354, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.24-25.349>
- [9] Wu D.J., Wang B. Influence of grinding to the surface and subsurface quality of KDP crystal. *Adv. Mat. Res.*, 2008, vol. 53–54, pp. 203–208, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.53-54.203>
- [10] Wu D.J., Cao X.S., Wang Q.G. et al. Damage detection and analysis of machined KDP crystal subsurface. *Optics and Precision Engineering*, 2007, vol. 15, no. 11, pp. 1721–1726.
- [11] Kozłowski M.R., Thomas I., Edwards M. Influence of diamond turning and surface cleaning processes on the degradation of KDP crystal surfaces. *Proc. SPIE*, 1991, no. 1561, pp. 50–64, doi: <https://doi.org/10.1117/12.50764>
- [12] Fuchs B.A., Hed P.P., Baker P.C. Fine diamond turning of KDP crystals. *Appl. Opt.*, 1986, vol. 25, no. 11, pp. 1733–1735, doi: <https://doi.org/10.1364/ao.25.001733>
- [13] Namba Y., Kataqirl M., Nakatsuka M. Single point diamond turning of KDP inorganic non-linear optical crystals for laser fusion. *JSPE*, 1998, vol. 64, no. 10, pp. 1487–1491, doi: <https://doi.org/10.2493/jjspe.64.1487>
- [14] Jacobs S.D. Manipulating mechanics and chemistry in precision optics finishing. *Sci. Technol. Adv. Mat.*, 2007, vol. 8, no. 3, pp. 153–157, doi: <https://doi.org/10.1016/j.stam.2006.12.002>
- [15] Miao C., Shen R., Wang M. Et al. Rheology of aqueous magnetorheological fluid using dual oxide-coated carbonyl iron particles. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2011, vol. 94, no. 8, pp. 2386–2392, doi: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2011.04423.x>
- [16] Beier M., Scheiding S., Gebhardt A. Et al. Fabrication of high precision metallic freeform mirrors with magnetorheological finishing (MRF). *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8884, art. 88840S, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2035986>
- [17] Wang C., Li X.Y., Ji F. The particle behavior analysis and design in the improvement of KDP finishing. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9532, art. 95321Z, doi: <https://doi.org/10.1117/12.2186005>
- [18] Jacobs S.D., Arrasmith S.R. Development of new magnetorheological fluids for polishing CaF₂ and KDP. *LLE Review*, 1999, vol. 80, pp. 213–219.
- [19] Peng X.Q., Jiao F.F. Novel magnetorheological figuring of KDP crystal. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, vol. 9, no. 10, pp. 10–22.
- [20] Cao Y.H., Li C. Magnetically separable Fe₃O₄/AgBr hybrid materials: highly efficient photocatalytic activity and good stability. *Nanoscale Res. Lett.*, 2015, vol. 10, art. 251, doi: <https://doi.org/10.1186/s11671-015-0952-x>
- [21] Rumpf K., Granitzer P. Magnetic interactions between metal nanostructures within porous silicon. *Nanoscale Res. Lett.*, 2014, no. 9, art. 412, doi: <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-412>

- [22] Zhang X. A model to predict the critical undeformed chip thickness in vibration-assisted machining of brittle materials. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2013, no. 69, pp. 57–66, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.03.006>
- [23] Moriwaki T., Shamoto E., Inoue K. Ultraprecision ductile cutting of glass by applying ultrasonic vibration. *CIRP Annals*, 1992, vol. 41, no. 1, pp. 141–144, doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61171-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61171-8)

Статья поступила в редакцию 15.05.2025

Информация об авторах

ОБРАЗЦОВ Александр Евгеньевич — аспирант кафедры «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: obrazcow2@mail.ru).

УТЕНКОВ Владимир Михайлович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: utencov@bmstu.ru).

КУЗНЕЦОВ Павел Михайлович — доктор технических наук, профессор кафедры «Системное моделирование и автоматизированное проектирование». Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (125993, Москва, Российская Федерация, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: profpol@rambler.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Образцов А.Е., Утенков В.М., Кузнецов П.М. Обеспечение качества поверхности анизотропных кристаллов за счет применения осциллирующих движений. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 2, с. 32–40.

Please cite this article in English as:

Obraztsov A.E., Utenkov V.M., Kuznetsov P.M. Ensuring the surface quality of anisotropic crystals by applying oscillating movements. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 2, pp. 32–40.

Information about the authors

OBRAZTSOV Alexander Evgenievich — Postgraduate, Metal-Cutting Machine Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: obrazcow2@mail.ru).

UTENKOV Vladimir Mikhailovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Metal-Cutting Machine Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: utencov@bmstu.ru).

KUZNETSOV Pavel Mikhailovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, System Modeling and Computer-aided Design Department. Moscow Aviation Institute (National Research University) (125993, Moscow, Russian Federation, Volokolamskoe Shosse, Bldg. 4, e-mail: profpol@rambler.ru).