



## РЕЗАНИЕ В РЕЖИМЕ КВАЗИПЛАСТИЧНОСТИ

В.Горохов, Е.Захаревич, М.Шавва, аспирант,  
ООО "Ресурс точности", [www.ultraprecision.ru](http://www.ultraprecision.ru);  
ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ", [www.vniinstrument.ru](http://www.vniinstrument.ru), Москва

В теории обработки резанием часто встречается термин "труднообрабатываемые материалы". Это и закаленные или нержавеющие стали, и твердые сплавы. Однако, отдельным классом среди всех труднообрабатываемых материалов можно, пожалуй, выделить хрупкие материалы: оптические стекла, кристаллы различных солей, монокристаллический кварц, кварцевые стекла, германий и т.д. Их высокая твердость и хрупкость вызывает большие трудности при обработке резанием – хрупкое разрушение материалов сопровождается активным трещинообразованием, появлением сколов и различных дефектов на обрабатываемых поверхностях. В то же время, специфика деталей, изготавливаемых из данных материалов, такова, что вопрос зачастую состоит не только в возможности обработки хрупких материалов на имеющемся оборудовании, но и в получении сверхточных поверхностей с нанометровой шероховатостью и минимальными внутренними напряжениями.

На данный момент большинство отечественных предприятий, занимающихся производством сверхточных деталей из хрупких материалов для оптической, электронной, медицинской, авиационной промышленности, в качестве основополагающей технологии использует технологию многократного шлифования обрабатываемых поверхностей с их последующей притиркой и доводкой (полированием) (рис.1). Эта технология весьма эффективна и испытана временем. Она позволяет получить необходимую точность и шероховатость для простых поверхностей (плоскость, сфера) практически во всех случаях. Однако на полную обработку времени зачастую не хватает. Обработка одной детали с точностью формы не более 100 нм и шероховатостью не более 10 нм требует иногда десятков часов. Двадцать первый век не терпит временных потерь, перед современными

## CUTTING IN THE QUASIPLASTIC MODE

V.Gorokhov, E.Zakharevich, M. Shavva, PhD.  
Student, Resurs tochnosti, Russian RD institute  
VNIINSTRUMENT, Author

In the machining theory, a common term is hard-to-cut materials. These are both hardened and stainless steel, and hard alloys. However, among all hard-to-cut materials, brittle materials can be distinguished as a separate class: optical glass, crystals of different salts, monocrystalline quartz, quartz glass, germanium, etc. Their high hardness and brittleness causes great difficulties in cutting as brittle fractures are accompanied by an active cracking, chipping and a variety of defects on the surface. At the same time, the specific nature of part manufactured of these materials is that often, the problem is not only in the machining capability of brittle materials using the existing equipment, but also in obtaining high-precision surfaces with nanometer roughness and minimal internal stresses.

At the moment, the majority of domestic enterprises engaged in the production of high-precision parts made of brittle materials for optical, electronic, medical and aviation industries, use multiple grinding of machined surfaces and their subsequent lapping and finishing (polishing) (Fig. 1) as a fundamental technology. This technology is very effective and time tested. It allows you to obtain the necessary accuracy and roughness for simple surfaces (plane, sphere) in almost all cases. However, it has often lack time. Processing of one part with a form accuracy of not more than 100 nm and a surface roughness of not more than 10 nm can take tens of hours. The twenty-first century is intolerant to time losses, there is an important task before modern technologies: to reduce the processing time of high-precision parts made of brittle materials, while ensuring the required accuracy and surface roughness. The task is not easy, but challenges are interesting by their nonstandard solutions which allow you to see the problem from a different angle.

Quasiplasticity, ductile cutting, processing in the quasiplastic mode are the modes of brittle material machining, when surface layers of the material are tested in respect of ductile properties [1]. It means



**Рис.1.** Примеры сверхточных деталей из хрупких материалов  
**Fig. 1.** Examples of high-precision parts made of brittle materials

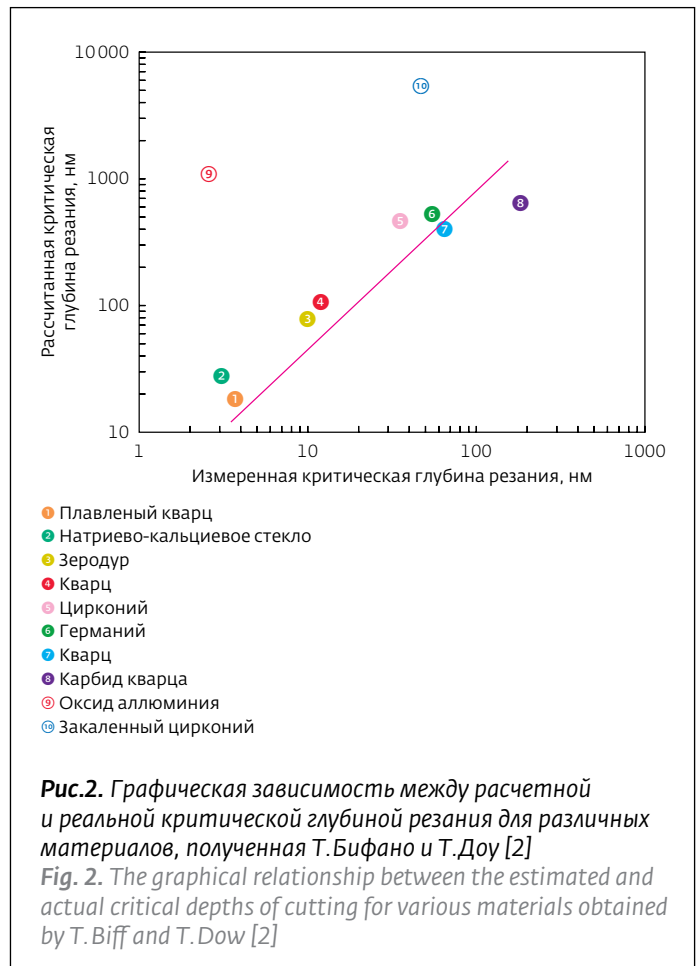
технологами стоит важная задача: сократить время обработки сверхточных деталей из хрупких материалов, обеспечив при этом необходимую точность и шероховатость. Задача не простая, но сложные задачи тем и интересны, что их нестандартное решение позволяет увидеть проблему под другим углом.

Квазипластичность, пластичное резание, обработка в режиме квазипластичности (ductile cutting) – режимы механической обработки хрупких материалов, при которых поверхностные слои материала проявляют пластичные свойства [1]. То есть, возможно назначить такую скорость, глубину резания, подачу режущего инструмента или заготовки, при которых в обрабатываемом материале возникнет настолько высокое напряжение, что механизм хрупкого разрушения сменится механизмом пластичного деформирования. Иными словами, при определенных режимах резания обработка деталей из монокристаллического кварца будет эквивалентна обработке деталей из конструкционной стали. Необходимо только понять, как назначить такие режимы резания и какое оборудование позволит их осуществить? Ответ на данный вопрос кроется в предыстории пластичного резания.

Итак, ductile cutting (пластичное резание) впервые было обнаружено в 1954 году. При экспериментальных исследованиях по фрикционному износу кристаллов каменной соли совершенно случайно было отмечено, что границы некоторых следов контакта образованы не сколами с характерными трещинами по краям, а словно оплавлены. Налицо были пластичные деформации хрупкого материала. Явление это, если не

that it is possible to set such a speed and a depth of cutting, a cutter feed speed or blank supply when so high stress emerges in the processed material that the mechanism of brittle fracture is replaced by the mechanism of ductile deformation. In other words, under certain cutting modes, machining the details of monocrystalline quartz is equivalent to machining the parts of structural steel. It is only needed to figure out how to set such cutting modes and what equipment enables to carry out them? The answer to this question lies in the history of ductile cutting.

So, ductile cutting was first discovered in 1954. In experimental studies on frictional wear of rock salt crystals, completely by accident, it was noted that the faces of some of the following contact marks were formed not by chipping with typical cracks around the edges, but as if melted. Ductile deformations of the brittle material were obvious. That phenomenon was, if not unique, then at least wonderful. But how to use it and how to create the conditions in the cutting zone, similar to those that had place when frictionizing numerous faces of salt crystals?



**Рис.2.** Графическая зависимость между расчетной и реальной критической глубиной резания для различных материалов, полученная Т.Бифано и Т.Доу [2]  
**Fig. 2.** The graphical relationship between the estimated and actual critical depths of cutting for various materials obtained by T. Biff and T. Dow [2]

уникальное, то, по крайней мере, удивительное. Но как его использовать и как воспроизвести в зоне резания условия, аналогичные тем, что имели место при трении многочисленных граничных солевых кристаллов?

Ответ на данный вопрос пытались дать Т. Бифано и Т. Доу. В конце 80-х годов двадцатого века, они ставят многочисленные опыты по пластичному шлифованию (ductile grinding).

В процессе экспериментальных работ, ученые выдвигают теорию о том, что глубина резания, при которой наблюдается пластическая деформация хрупких материалов прямо пропорциональна квадрату коэффициента интенсивности напряжений (трещиностойкости) и модулю упругости материала и обратно пропорциональна кубу твердости [2]. Как это часто бывает, практика лишь частично доказала выдвинутую теорию. Однако, Т. Бифано и Т. Доу смогли сделать главное – они обнаружили границы хрупко-пластичного перехода для кварца, германия, ситалла, кварцевого стекла, оптического стекла и других материалов (рис.2).

Несмотря на то, что данные Бифано и Доу получены более двадцати лет назад, многие зарубежные исследования до сих пор базируются на приведенных ими режимах. Параллельно с экспериментами по пластичному шлифованию развивается технология пластичного точения хрупких материалов. Тош и McPherson [3] обнаружили, что пластически деформированная стружка при обработке керамических материалов появлялась тогда, когда глубина резания составляла менее 1 мкм. В то же время Blake и Scattergood [4], изучавшие обработку германия и кремния, пришли к выводу, что главным параметром, который управляет переходом от хрупкого разрушения к пластичному, является толщина срезаемого слоя, т.е. глубина резания. Puttick [5], проводивший алмазное точение стекла с глубиной резания порядка 100 нм, достиг шероховатости поверхности  $R_a$  0,6 мкм. Leung [6] выполнил непосредственно обработку кремния на прецизионном токарном станке с шероховатостью 2,86 нм и также пришёл к выводу, что для того, чтобы получить высококачественную поверхность, необходимо проводить обработку в пластичном режиме и толщина стружки (глубина резания) должна быть меньше критического значения, назначенного Бифано и Доу.

При пластичном точении стружка, образующаяся в зоне радиуса округления режущей кромки, имеет форму "запятой". Размеры

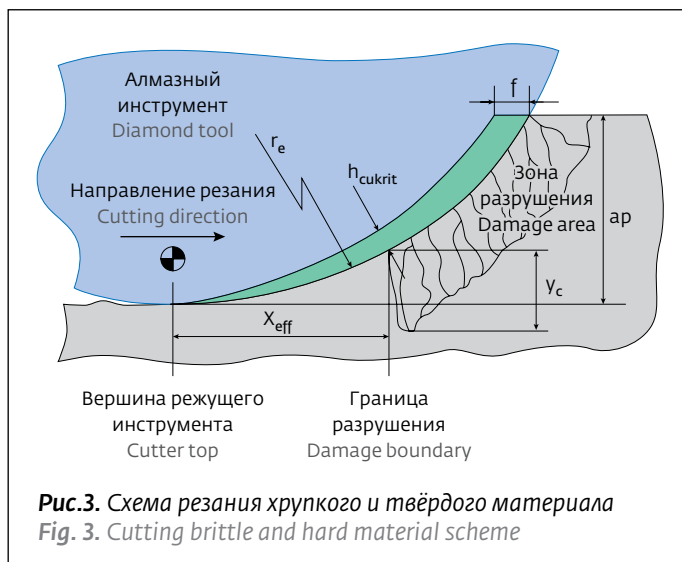


Рис.3. Схема резания хрупкого и твёрдого материала  
Fig. 3. Cutting brittle and hard material scheme

Bifano T. and Dow T. tried to give the answer to this question. In the late 80s of the twentieth century, they put numerous experiments on ductile grinding.

During experimental studies, scientists have advanced a theory that the cutting depth, at which a ductile deformation of brittle materials is observed, is

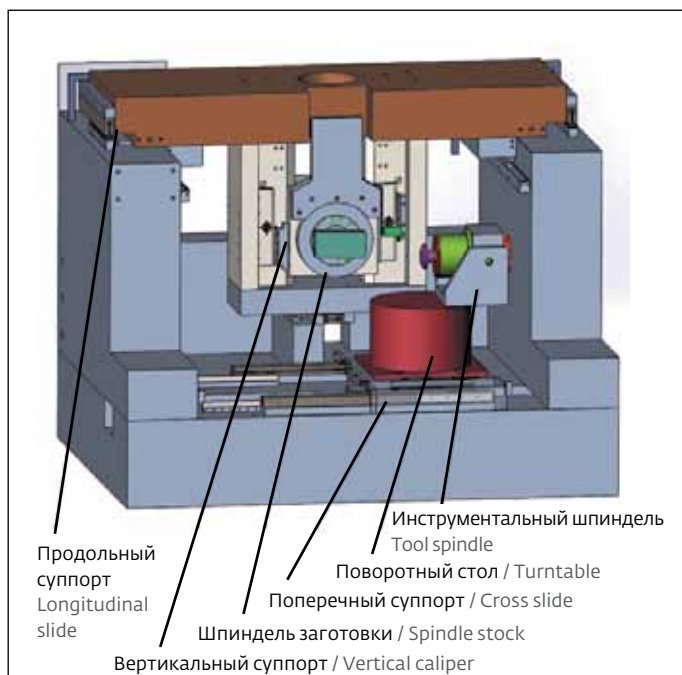


Рис.4. Схема разрабатываемого сверхжесткого ультра-прецизионного экспериментального стенда для алмазного точения и шлифования в квазипластичном режиме  
Fig. 4. The scheme of the developed super hard ultrahigh-precision experimental stand for diamond turning and grinding in the quasiplastic mode



**Рис.5.** Зона резания при алмазном фрезеровании дигидрофосфата калия

*Fig. 5. Cutting zone when diamond milling potassium dihydrogen phosphate*

стружки изменяются от нуля вблизи вершины инструмента до максимального значения у торца стружки (рис.3). Как уже было сказано выше, Blake пришел к выводу, что переход от хрупкого

directly proportional to the square of stress-intensity factor (fracture toughness) and modulus of material elasticity, and inversely proportional to the cube of hardness [2]. As is often happens, the practice has proven the advanced theory only partially. However, Bifano T. and Dow T. could do the main thing, they found the borders of brittle-ductile transition for quartz, germanium, glass-ceramic, quartz glass, optical glass and other materials (Fig. 2).

Despite the fact that Biff's and Dow's data were received more than twenty years ago, many foreign studies are still based on the above modes. Along with the experiments on ductile grinding, the technology of ductile turning for brittle materials develops. Toh and McPherson [3] have found that plastically deformed chips, when processing ceramic materials, appears when the cutting depth is less than 1 micron. At the same time, Blake and Scattergood [4] who studied the processing of germanium and silicon, have come to the conclusion that the main parameter that controls the transition from brittle fracture to ductile fracture, is the thickness of the cutting layer, i.e., depth of cutting. Puttic [5], who performed the diamond turning of glass with a cutting depth of about 100 nm, reached a surface roughness Ra of 0,6 microns. Leung [6] performed directly the machining



к пластичному режиму съема стружки определяется критической толщиной стружки. Повреждения, которые прогнозируются при пластичной обработке, не распространяются на обработанную поверхность, так как они постепенно устраняются при последующем перебеге, что обусловлено согласованностью величины радиуса инструмента и подачи, которые в свою очередь определяют поперечное сечение стружки.

Таким образом, пластичное резание, объединяющее пластичное шлифование и пластичное точение – это явления, наблюдаемые при очень малой, нанометровой, глубине резания. Для осуществления обработки в режиме квазипластичности необходимо обеспечить:

- использование сверхжесткого ультрапрецизионного станка, способного обеспечить необходимые режимы резания;
- кинематику резания, которая позволит добиться минимальной толщины, срезаемой стружки;
- использование алмазного монокристаллического с остротой режущей кромки – 20–50 нм или абразивного инструмента с микронной зернистостью.

ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" совместно с ООО "Ресурс точности" и МГТУ им. Н.Э. Баумана более трех лет ведут разработки и исследования в области создания ультрапрецизионного оборудования для обработки широкого спектра материалов. В 2014 году в рамках Федеральной целевой

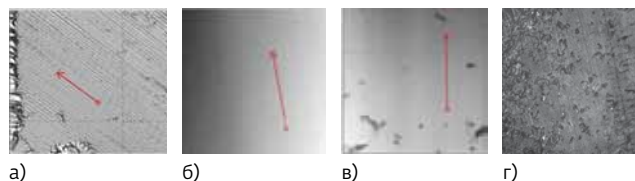


**Рис.6.** Настройка специального экспериментального стенда при алмазном шлифовании сапфира  
**Fig. 6.** Setting up of the special experimental stand for diamond grinding of sapphire

of silicon on the turning lathe with a roughness of 2.86 nm, and also came to the conclusion that in order to obtain a high-quality surface, it is necessary to carry out the processing in the ductile mode and the chip thickness (cutting depth) should be less than the critical value set by Biff and Dow.

When ductile turning, chips formed in the corner radius zone of the cutting edge has a form of "comma". Chip sizes vary from zero near the top of the equipment to a maximum value at the chip ends (Figure 3). As already mentioned above, Blake came to the conclusion that the transition from brittle mode to ductile mode of chip removal is determined by the critical chip thickness. Damages, which are expected when ductile processing, are not subject to the processed surface, as they are gradually eliminated by subsequent overtravel due to the consistency of the equipment radius and supply, which in turn determine the chip cross-section.

Thus, ductile cutting: ductile grinding and ductile turning are phenomena observed in a very



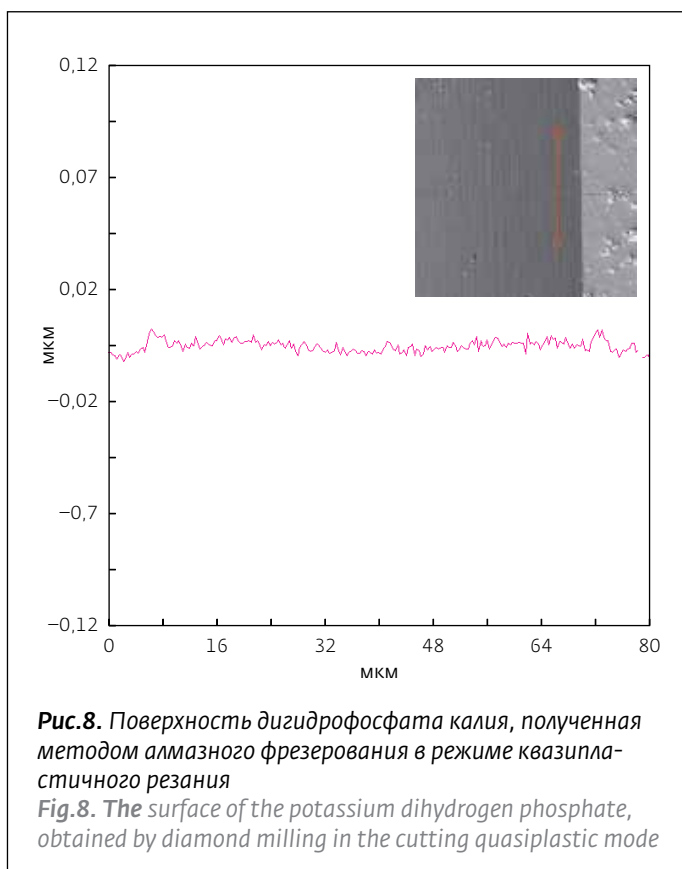
**Рис.7.** Поверхности, обработанные методом алмазного шлифования в режиме квазипластичного резания: а) кварцевое стекло, полученная шероховатость поверхности – 6 нм; б) ситал, полученная шероховатость поверхности – 3 нм; в) сапфир, полученная шероховатость поверхности – 1 нм; г) монокристаллический кварц, полученная шероховатость поверхности – 34 нм (процесс перехода хрупкого резания в пластичное)

**Fig. 7.** Surfaces treated by diamond grinding in the quasiplastic mode: a.) quartz glass, an obtained surface roughness is 6 nm; b.) pyroceram, an obtained surface roughness is 3 nm; c.) sapphire, an obtained surface roughness is 1 nm; g) single-crystal quartz, an obtained surface roughness is 34 nm (brittle transition in ductile cutting)

программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы" ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" заключил Соглашение на выполнение прикладных научных исследований по теме "Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания".

В рамках проекта запланировано создание сверхжесткого ультрапрецизионного экспериментального стенда для алмазного точения и шлифования в квазипластичном режиме (рис.4), а также предназначенного для отработки технологии обработки хрупких материалов методом пластичного резания.

На данный момент на имеющемся ультрапрецизионном оборудовании проведены предварительные экспериментальные исследования по обработке дигидрофосфата калия, сапфира, монокристаллического кварца, кварцевого стекла и ситалла. Обработка материалов проводилась путем фрезерования алмазным монокристаллическим инструментом и алмазным шлифованием (рис.5, 6) при реализации



**Рис.8.** Поверхность дигидрофосфата калия, полученная методом алмазного фрезерования в режиме квазипластичного резания

**Fig.8.** The surface of the potassium dihydrogen phosphate, obtained by diamond milling in the cutting quasiplastic mode



специальной кинематической схемы резания, которая обеспечивала толщину снимаемой стружки в пределах от 4 до 34 нм.

В результате экспериментов по алмазному шлифованию кругом зернистостью 2/3 мкм были получены участки обработанных поверхностей с шероховатостью от 2 до 34 нм (в зависимости от материала и режимов обработки) (рис.7). На поверхностях ярко выражены "следы подачи" режущего инструмента и отсутствие сколов и трещин. Это гарантирует, что в зоне резания при обработке материал находился в состоянии квазипластичности.

При алмазном фрезеровании дигидрофосфата калия шероховатость обработанной поверхности составила 1-3 нм (рис.8). Также были видны следы подачи режущего инструмента. На рис.7 также видна граница хрупко-пластичного перехода.

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

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

small, nanometer depth of cutting. Performing the processing in the quasiplastic mode requires:

- The use of a super hard ultrahigh-precision machine capable of providing the necessary cutting modes;
- Kinematics of cutting, which ensures the minimum thickness of cut chips;
- The use of single-crystal diamond with a cutting edge sharpness of 20...50 nm or abrasive tools with micron grit.

OJSC "VNIINSTRUMENT" together with "Resurs Tochnosti, Ltd." and N.E.Bauman MSTU have been conducting development and research in the field of ultrahigh-precision equipment for more than three years to handle a wide range of materials. In 2014, within the framework of the Federal Target Program "Research and development in priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014-2020", OJSC "VNIINSTRUMENT" entered into an agreement to perform applied research on the topic "Development of technology and equipment for nanoscale processing of optical materials with single crystal diamond and abrasive tools in the quasiplastic cutting mode".

Within the project, it is planned to create a super hard ultrahigh-precision experimental stand for diamond turning and grinding in the quasiplastic mode (Fig. 4), as well as for processing brittle materials by the ductile cutting method.

At the moment, on the available ultrahigh-precision equipment, preliminary experimental studies are conducted on processing of: dihydrogen phosphate of potassium, sapphire single crystal quartz, quartz glass and glass-ceramic. Material processing was performed by grinding with a diamond single crystal tool and by diamond milling (Fig.5, 6) when implementing a special cutting kinematic scheme that ensures a thickness of the removed chips in the range of 4 to 34 nm.

As a result of experiments in terms of grit diamond grinding 2/3 microns, the processed surface areas were obtained with a roughness of 2 to 34 nm (depending

## ЛАЗЕРЫ В НАУКЕ, ТЕХНИКЕ, МЕДИЦИНЕ

В сентябре 2015 года научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им.А.С.Попова проводит в Туапсе свою традиционную конференцию "Лазеры в науке, технике медицине". Предполагается работа секций по направлениям: лазерные

информационные и технологические комплексы; биомедицинские применения лазеров; оптико-электронные системы; терагерцевые системы; лазерные технологии и диагностика сред; фемтосекундные лазеры и их применение; функциональные материалы для

лазерной техники. До 1 августа можно подать заявку на участие: [mntores@mail.ru](mailto:mntores@mail.ru), а вся текущая информация о конференции находится по адресу: [www.mntores.inlife.ru](http://www.mntores.inlife.ru).

*Н.Смольская*

Статья подготовлена в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" по Соглашению № 14.579.21.0042 от 25.08.2014 "Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания" между ОАО "ВНИИИНСТРУМЕНТ" и Министерством образования и науки РФ.

#### ЛИТЕРАТУРА

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

on the material and processing conditions) (Fig. 7). On the surfaces "feeding traces" of the cutting tool and the absence of chips and cracks are significantly obvious. This ensures that when processing the material was in the quasiplastic condition in the cutting zone.

When diamond milling potassium dihydrogen phosphate, the roughness of the processed surface was 1–3 nm (Fig. 8). There were also traces of cutter feeding. Fig. 7 also shows the boundary of the brittle-ductile transition.

The future plans of OJSC "VNIINSTRUMENT" is development of manufacturing technology for flat, spherical, aspherical and general surfaces using methods of diamond turning and grinding in the cutting quasiplastic mode. It is also planned to manufacture the components and install a special ultrahigh-precision stand for implementation of cutting quasiplastic modes when processing brittle materials.

Thus, the processing using the ductile cutting method and a special tool (a diamond wheel on the metallic bond, a cutter or a mill) allows to receive the optical surface when processing almost any brittle material, on the surfaces of virtually any shape (lattices, freeform surfaces with nanometer precision and roughness with almost complete absence of the damaged layer. In this case, the operation of polishing is either completely eliminated or takes minimal time.

This article was prepared within the framework of the Federal Program "Research and development in the priority directions of scientific-technological complex of Russia for 2014–2020" under the Agreement No. 14.579.21.0042 of 25.08.2014 "Development of technology and equipment for nanoscale processing of optical materials with monocrystalline diamond and abrasive tools in the cutting quasiplastic mode" between OJSC "VNIINSTRUMENT" and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.