

УДК 67.02

DOI 10.18698/0536-1044-2016-7-64-71

## Экспериментальное определение границ хрупкопластичного перехода при резании хрупких материалов\*

Е.М. Захаревич<sup>1</sup>, В.В. Лапшин<sup>1</sup>, М.А. Шавва<sup>1</sup>, С.В. Грубый<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ», 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

## The Experimental Determination of the Ductile-Fracture Transition Boundaries when Cutting Brittle Materials

E.M. Zakharevich<sup>1</sup>, V.V. Lapshin<sup>1</sup>, M.A. Shavva<sup>1</sup>, S.V. Grubyu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT, 107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49

<sup>2</sup> BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1



e-mail: 04@vniinstrument.ru, vasylap@mail.ru, katapu@mail.ru, grusv@yandex.ru



Обработка хрупких оптических материалов — одна из основных задач современного оптико-механического производства. Для повышения производительности обработки хрупких оптических материалов необходимо снизить долю основного времени, приходящегося на черновые и получистовые операции, и повысить качество поверхностей при чистовых и финишных операциях. Специалисты ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках Соглашения по федеральной целевой программе проводят комплекс технологических и экспериментальных исследований и конструкторских разработок, направленных на повышение производительности, точности и качества обработки хрупких оптических материалов. Рассмотрена гипотеза о «квазипластичности» хрупких материалов, т. е. о замене в определенных условиях хрупкого разрушения на пластичное резание. Обработка хрупких материалов резанием в режиме «квазипластичности» позволяет снизить вероятность образования трещин, что обеспечивает уменьшение глубины дефектного слоя и повышение качества обработанных поверхностей.

**Ключевые слова:** сверхточная обработка, обработка хрупких материалов, «квазипластичное» резание, границы хрупкопластичного перехода.



Machining of brittle optical materials is one of the main tasks of modern optical-mechanical industry. To improve the efficiency of brittle optical material machining it is necessary to reduce the time allocated to roughing and semi-finishing operations, and to increase the quality of surfaces after fine and finishing operations. At the Russian Research & Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT and Bauman Moscow State Technical University, technological and experimental research and design developments directed at the improvement of performance, accuracy and quality of processing of brittle optical materials is being performed within the framework of the Agreement for the Federal Target Program. The research is based on the preliminary proposition about quasi plasticity of

\* Работа выполнена в рамках Соглашения от 25.08.2014 № 14.579.21.0042 (уникальный идентификатор RFMEFI57914X0042) между ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и Министерством образования и науки Российской Федерации по теме «Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания».

brittle materials, i.e. the change from brittle fracture to plastic cutting under certain conditions. When brittle materials are machined in the quasi plastic state, it can decrease the depth of the defect layer and improve the machined surface quality.

**Keywords:** ultra-precision processing, brittle material processing, quasi-plastic cutting, ductile-fracture transition boundaries.

Взаимодействие хрупкого материала с режущим лезвийным или абразивным инструментом проходит несколько стадий. Первая стадия характеризуется образованием трещин, вторая — ростом трещин, при котором наблюдается увеличение силы резания. На третьей стадии материал отделяется посредством скола, сила резания падает до нуля. Процесс обработки хрупких материалов, проходящий через все три стадии, характеризуется образованием боковых и конических трещин [1, 2].

Зарубежные и отечественные исследователи отмечают, что в определенных условиях хрупкий обрабатываемый материал ведет себя как

пластичный [3]. Доказательством этого может служить образование царапины со следами пластического течения материала при царапании твердого сплава, керамики и алмазов [3]. Обработка хрупких материалов путем пластического деформирования позволяет снизить вероятность образования трещин, что приводит к уменьшению глубины дефектного слоя и повышению качества обрабатываемой поверхности.

Условия пластического деформирования хрупкого материала при резании зависят от свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров режущего инструмента,

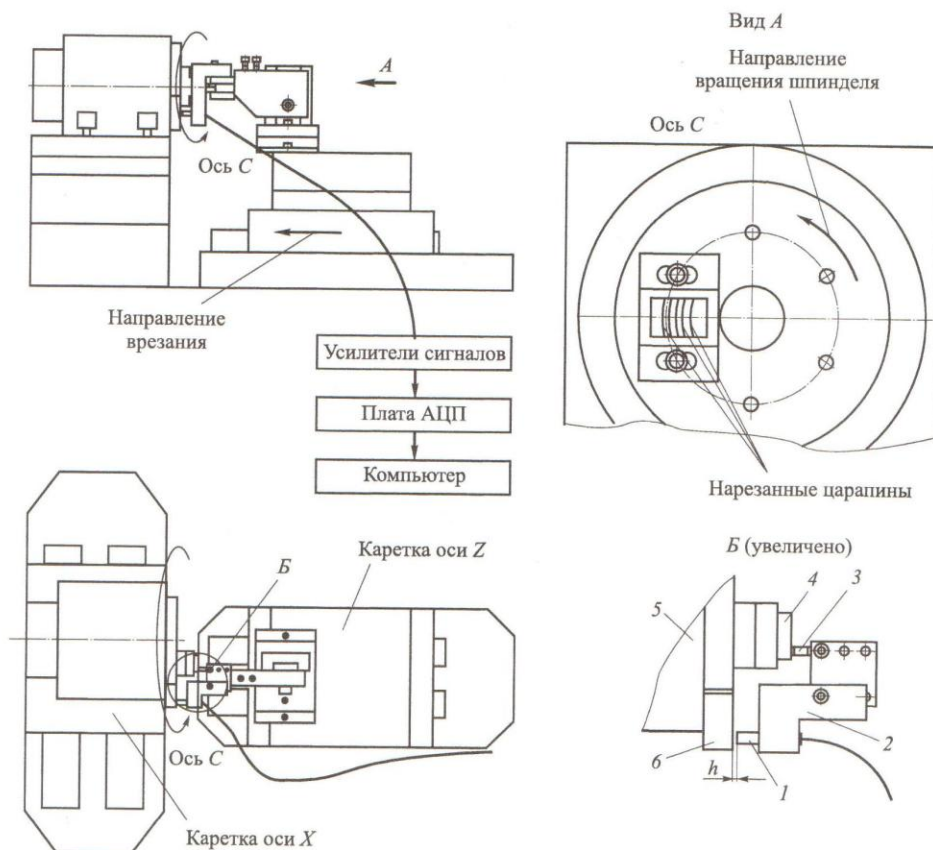
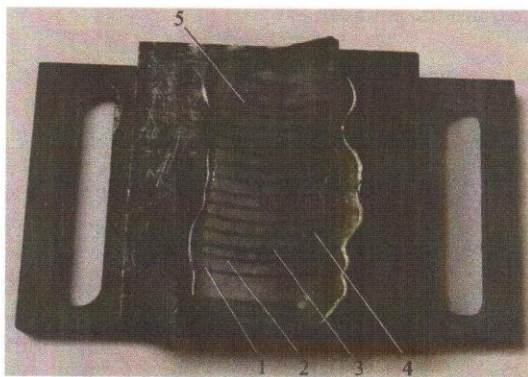


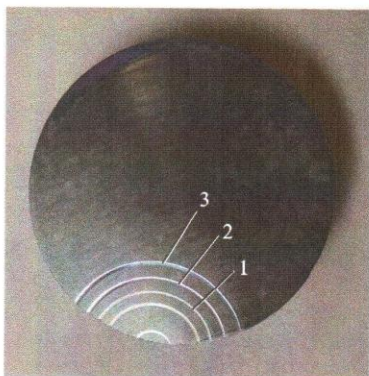
Рис. 1. Экспериментальный сверхточный стенд для определения критической толщины срезаемого слоя: 1 и 2 — бесконтактный емкостной датчик и его кронштейн; 3 — алмазный монокристаллический резец; 4 и 5 — заготовка и ее шпиндель; 6 — проставок;  $h$  — измеряемый зазор

скорости деформирования материала, величины приложенной нагрузки и температуры [4]. Все перечисленные факторы влияют на границу

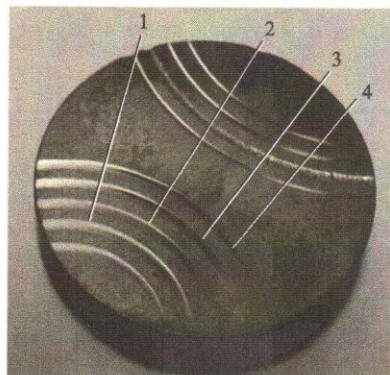
хрупкопластичного перехода материала, однако наиболее важным из них принято считать толщину срезаемого слоя. И в литературных ис-



а



б



в

Рис. 2. Образцы, используемые в эксперименте:  
а — дигидрофосфат калия; б — кремний; в — германий; 1–5 — номера царапин

#### Параметры царапин, выполненных на поверхности заготовки

Обрабатываемый материал	Номер царапины	Глубина резания, мкм		Упругое отжатие, мкм
		номинальная	фактическая	
Дигидрофосфат калия	1	2,02	1,74	0,29
	2	1,54	1,31	0,23
	3	0,76	0,60	0,16
	4	0,52	0,46	0,06
	5	0,09	0,08	0,01
Кремний	1	0,51	0,25	0,26
	2	0,24	0,10	0,14
	3	0,10	0,08	0,02
Германий	1	1,01	0,77	0,24
	2	0,48	0,33	0,15
	3	0,23	0,16	0,07
	4	0,10	0,07	0,03

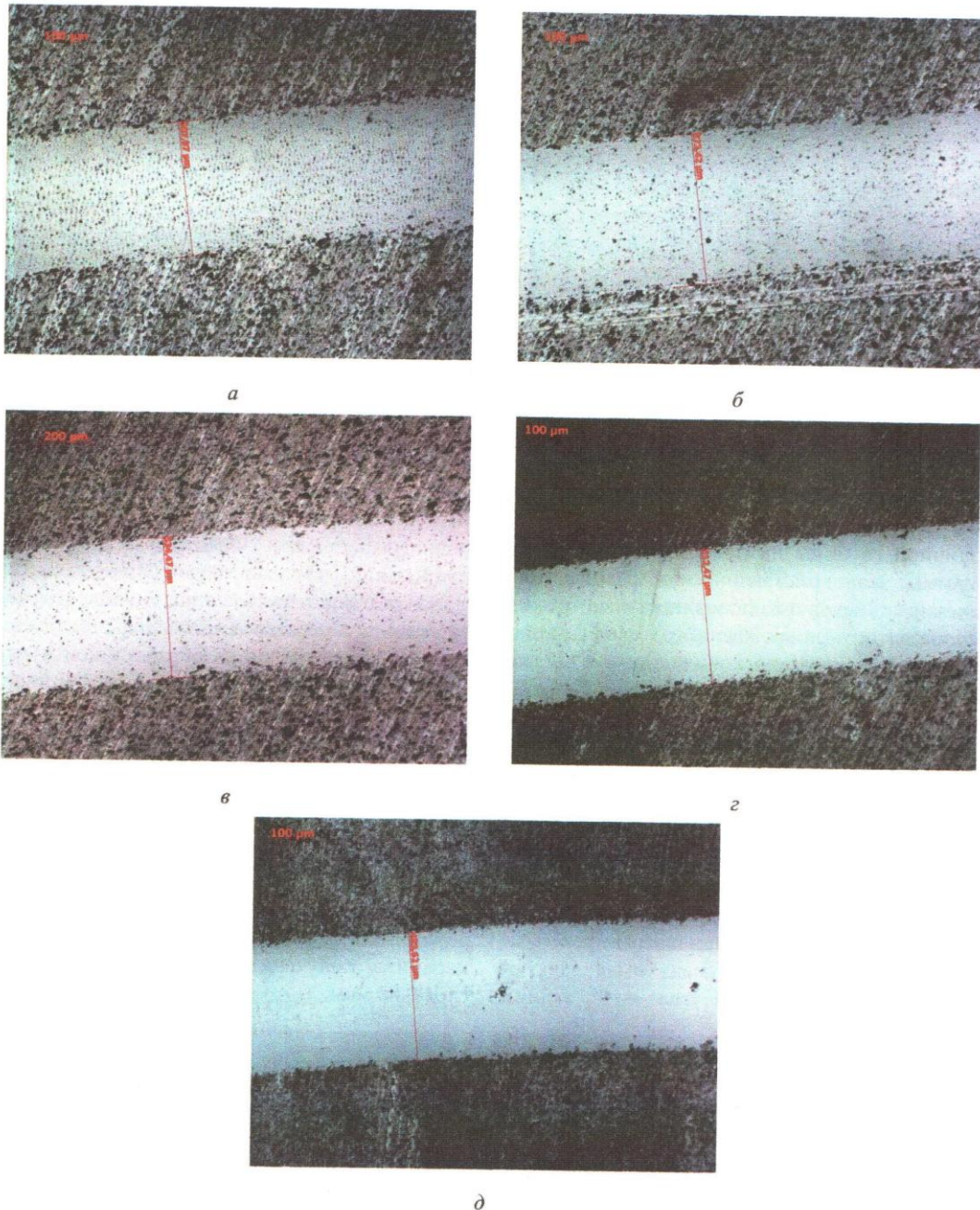


Рис. 3. Внешний вид царапин 1 (а), 2 (б), 3 (в), 4 (г), 5 (д), выполненных на поверхности заготовки из дигидрофосфата калия

точниках, и по результатам экспериментальных исследований отмечено, что существует критическая толщина, меньше которой хрупкий характер разрушения заменяется пластичным.

Цель работы — экспериментальное определение критической толщины срезаемого слоя

для монокристаллов, используемых в оптике и микроэлектронике: дигидрофосфата калия ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), кремния и германия.

Эксперименты проведены на сверхточном стенде (рис. 1) [5], оснащенном бесконтактным емкостным датчиком 1, необходимым для из-

мерения упругих отжатию режущего инструмента в процессе обработки. Заготовку 4 через проставок 6 (к которому ее приклеивали смесью из парафина и канифоли) закрепляли на шпинделе 5 (ось *C*), установленном на каретке оси *X*. В качестве инструмента для нанесения царапин использовали алмазный монокристаллический резец 3, который устанавливали в резцедержатель, закрепленный на каретке оси *Z*. Для измерения и контроля жесткости системы бесконтактным датчиком фиксировали изменение зазора  $h$  в контакте между датчиком и проставком. Измерение зазора  $h$  позволяет рассчитать фактическую глубину резания. Для принятой кинематической схемы резания фактическая глубина царапины равна толщине срезаемого слоя.

Определение критической толщины срезаемого слоя проводили путем нанесения резов различной глубины на поверхность заготовки алмазным монокристаллическим резцом. Для удаления с исходной поверхности заготовки трещиноватого (поврежденного) слоя выполняли начальные резы в количестве 3–4 шт. по одному и тому же профилю суммарной глубиной резания не менее 5 мкм, а затем — чистой единичный рез заданной глубины.

Из работ [6–8] следует, что для лезвийной обработки хрупких материалов в режиме «квазипластичного» резания необходимо использовать алмазный инструмент с нулевым или отрицательным передним углом, а также с радиусом округления режущей кромки в диапазоне 30...50 нм [9]. В соответствии с этими рекомендациями алмазный инструмент имел следующие параметры: передний угол — 0°, задний

угол — 12°, радиус округления кромки — не более 50 нм [1].

На образцах дигидрофосфата калия, кремния и германия были выполнены серии царапин с различной глубиной чистового реза (рис. 2) [1]. Скорость резания для всех резов составляла 300 мм/мин.

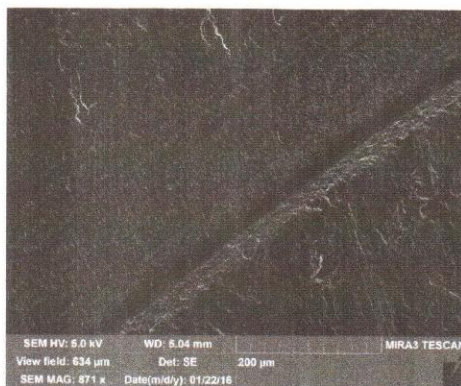
В связи с наличием упругого отжатию режущего инструмента введены понятия номинальной и фактической глубин резания. Первая из них задается приводом каретки оси *Z*, вторую вычисляют с учетом упругих отжатию инструмента от заготовки.

В таблице приведены значения глубин резания и упругого отжатию режущего инструмента для царапин, номера которых соответствуют позициям рис. 2.

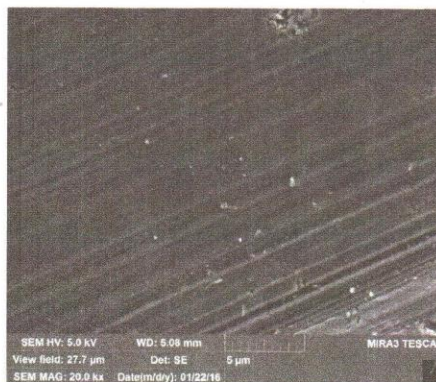
На рис. 3 показан внешний вид царапин 1–5, выполненных на поверхности заготовки из дигидрофосфата калия. Фотографии получены на микроскопе Zeiss Axio Imager Z2.

За критерий перехода к пластичному характеру резания обрабатываемого материала принято число хрупких сколов на обработанной поверхности. Из рис. 3 следует, что лучшее качество без хрупких сколов наблюдается на поверхности царапины 5, полученной при глубине резания (толщине срезаемого слоя) 0,08 мкм.

Внешний вид царапин 1 и 3, выполненных на монокристаллическом кремнии, приведен на рис. 4. Фотографии получены на микроскопе Tescan Mira 3. На рис. 4, б отсутствуют хрупкие сколы, видны только следы микрорельефа обработанной поверхности. Соответствующая царапина получена при толщине срезаемого слоя 0,08 мкм.



а



б

Рис. 4. Внешний вид царапин 1 (а) и 3 (б), выполненных на поверхности заготовки из монокристаллического кремния

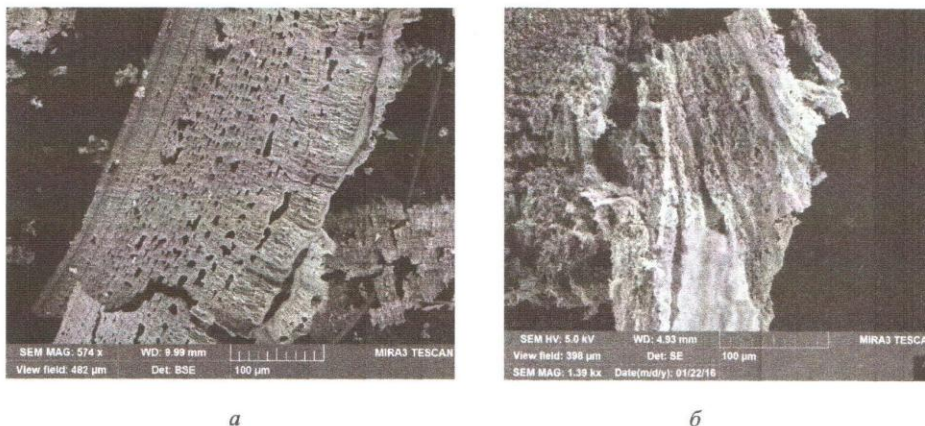


Рис. 5. Внешний вид стружки, полученной при обработке дигидрофосфата калия (а) и кремния (б) в режиме «квазипластичности»

При обработке германия были получены аналогичные результаты.

При выполнении резов на образцах из хрупких материалов (толщина срезаемого слоя 0,08 мкм и менее) отмечено образование сливной стружки, что подтверждает переход материала в пластичное состояние при стружкообразовании. На рис. 5 приведены соответствующие фотографии стружки, полученной при обработке дигидрофосфата калия и кремния.

## Выводы

1. Экспериментально подтверждена возможность перехода от режима хрупкого разрушения материала к режиму «квазипластичного»

резания, обеспечивающему оптическое качество обработки.

2. С помощью разработанной методики определена критическая толщина срезаемого слоя в пределах 80...100 нм при переходе хрупких монокристаллических оптических материалов — дигидрофосфата калия, кремния и германия — в «квазипластичное» состояние, исходя из кинематических параметров резания.

3. При исследовании стружки, полученной в ходе экспериментов, отмечено изменение ее структуры и вида (переход в сливную стружку).

4. Алмазную лезвийную обработку поверхностей оптических элементов из хрупких материалов целесообразно выполнять на отечественных сверхточных станках нового поколения.

## Литература

- [1] Захаревич Е.М., Горохов В.С., Лапшин В.В., Шавва М.А. Механика разрушения хрупких оптических материалов. *Фотоника*, 2016, № 1, с. 32–39.
- [2] Балыков А.В. *Формообразование отверстий в деталях из неметаллических материалов алмазным инструментом*. Москва, ИЦ МГТУ «Станкин», 2007. 184 с.
- [3] Хрульков В.А., Головань А.Я., Федотов А.И. *Алмазные инструменты в прецизионном приборостроении*. Москва, Машиностроение, 1977. 222 с.
- [4] Liu K., Li X.P., Liang S.Y. The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 33, is. 9–10, pp. 875–884.
- [5] Shavva M.A., Lapshin V.V., Grubby S.V. Processing of brittle materials in the nanometer range of thickness of layers cut. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, is. 1, no. 012062, doi: 10.1088/1757-899X/91/1/012062.
- [6] Blackley W.S., Scattergood R.O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precision Engineering*, 1991, vol. 13, is. 2, pp. 95–103, doi: 10.1016/0141-6359(91)90500.

- [7] Goel S., Luo X., Comley P., Reuben R.L., Cox A. Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide. *International Journal of Tool and Manufacture*, 2013, vol. 65, pp. 15–21.
- [8] Patten J.A., Gao W. Extreme negative rake angle technique for single point diamond nano-cutting of silicon. *Precision Engineering*, 2001, vol. 25, is. 2, pp. 165–167.
- [9] Borovskii G.V., Shavva M.A., Zakharevich E.M., Grubyy S.V., Maslov A.R. Ultraprecision machining of brittle optical materials. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 12, pp. 883–886.

## References

- [1] Zakharevich E.M., Gorokhov V.S., Lapshin V.V., Shavva M.A. Mekhanika razrusheniia khrupkikh opticheskikh materialov [Experimental definition of the boundaries of brittle-ductile transition when cutting]. *Fotonika* [Photonics], 2016, no. 1, pp. 33–39.
- [2] Balykov A.V. *Formoobrazovanie otverstii v detaliakh iz nemetallicheskih materialov almaznym instrumentom* [Forming holes in the details of the non-metallic materials with diamond tools]. Moscow, Stankin publ., 2007. 184 p.
- [3] Khrul'kov V.A., Golovan' A.Ia., Fedotov A.I. *Almaznye instrumenty v pretsizionnom priboro-stroenii* [Diamond tools in precision instrumentation]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1977. 222 p.
- [4] Liu K., Li X.P., Liang S.Y. The mechanism of ductile chip formation in cutting of brittle materials. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, vol. 33, is. 9–10, pp. 875–884.
- [5] Shavva M.A., Lapshin V.V., Grubyy S.V. Processing of brittle materials in the nanometer range of thickness of layers cut. *IOP Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, is. 1, no. 012062, doi: 10.1088/1757-899X/91/1/012062.
- [6] Blackley W.S., Scattergood R.O. Ductile-regime machining model for diamond turning of brittle materials. *Precision Engineering*, 1991, vol. 13, is. 2, pp. 95–103, doi: 10.1016/0141-6359(91)90500.
- [7] Goel S., Luo X., Comley P., Reuben R.L., Cox A. Brittle-ductile transition during diamond turning of single crystal silicon carbide. *International Journal of Tool and Manufacture*, 2013, vol. 65, pp. 15–21.
- [8] Patten J.A., Gao W. Extreme negative rake angle technique for single point diamond nano-cutting of silicon. *Precision Engineering*, 2001, vol. 25, is. 2, pp. 165–167.
- [9] Borovskii G.V., Shavva M.A., Zakharevich E.M., Grubyy S.V., Maslov A.R. Ultraprecision machining of brittle optical materials. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, no. 12, pp. 883–886.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016