



Минпромторг поддержал проект «Работай в России!»

При поддержке Министерства промышленности и торговли Российской Федерации к ширококомасштабному проекту Союза машиностроителей России «Работай в России!» и Всероссийской акции «Неделя без турникетов» присоединяются ведущие холдинги и концерны оборонно-промышленного комплекса и фармацевтического рынка.

По словам заместителя генерального директора АО «Росэлектроника», руководителя проекта «Работай в России!» Арсения Брыкина, отличительной чертой данного мероприятия является формирование системного представления о действующих производствах России:

«Специально подготовленные тематические экскурсии включают в себя, помимо просмотра выставочных экспозиций, посещение производственных подразделений, встречи с конструкторами, инженерами и специалистами предприятий радиоэлектроники. Мы уверены, что такое прямое общение позволяет более взвешенно оценить перспективы и востребованность выбираемых подростками профессий, помогает осознанно принять решение о работе на промышленном производстве», — отметил он.

Напомним, что с 18 по 24 апреля 2016 года в стране пройдет Всероссийская акция «Неделя без турникетов» с целью ознакомления учащихся и студентов с предприятиями и профессиями, востребованными на современном промышленном производстве, представить будущим специалистам и их родителям реальные рабочие места и условия труда.

Акция проводится ежегодно в рамках проекта «Работай в России!» по всей стране в 3-ю неделю апреля и 3-ю неделю октября. В этом году ожидается участие более 500 предприятий и более 50 000 школьников и студентов, которые увидят реальный сектор экономики.

Справка:

Широкомасштабный профориентационный проект «Работай в России», объединяющий молодежные инициативы, ориентирован на повышение престижа рабочих и инженерных профессий в России. Ключевым мероприятием проекта является Всероссийская акция «Неделя без турникетов», предполагающая знакомство школьников старших классов и студентов профильных вузов с историей и действующими производствами высокотехнологичных предприятий России.

Пресс-служба проекта «Работай в России!»
workinrussia@soymash.ru
workinrussia@bk.ru

Научно-технический журнал

Известия высших учебных заведений. Машиностроение

Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-48342 ISSN 0536-1044 DOI 10.18698/0536-1044-2016-4

#4 (673) 2016
апрель

Учредители: ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Издатель: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 499 263-69-50, 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97 rpress@bmtu.ru, www.baumanpress.ru

Редакция: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1 +7 499 263-63-54, izvestia@bmtu.ru www.izvestia@bmtu.ru; www.izvestiamash.ru

Издается с 1958 г. Выходит ежемесячно
Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней
Журнал включен в систему РИЦ, Russian Science Citation Index на платформе Web of Science
При использовании материалов ссылка обязательна

Подписной индекс журнала «Известия высших учебных заведений. Машиностроение» на 2016 г. 70370 в объединенном каталоге «Пресса России» www.pressa-rf.ru
Подписку также можно оформить: - в агентстве «Урал-Пресс» +7 495 961-23-62, www.ural-press.ru - в редакции журнала +7 499 263-63-54, izvestiamash@bmtu.ru www.izvestiamash.bmtu.ru

Главный редактор: К.С. Колесников академик РАН, преподаватель редакллегии
Зам. главного редактора: С.С. Гаврюшин д-р техн. наук
Ответственный секретарь: Е.Н. Андропова
Ведущая: Н.Ф. Бердальцева
Дизайн: А.С. Ключева

Редакционная коллегия:
И.Т. Амосов канд. техн. наук (Барский технический университет им. академика М.С. Осипи)
В.В. Артемьев д-р техн. наук, исполн. директор ассоциации «СТЕПР-ТРИТЛ»
А.С. Васильев д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
С.Д. Ваулин д-р техн. наук (Ожно-Уральский государственный университет)
В.А. Глазунов д-р техн. наук (ИММШ РАН)
А.К. Григорян канд. физ.-мат. наук (Ереванский государственный университет)
Ю.И. Дмитриченко д-р физ.-мат. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

А.Е. Дриваль д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
Т.В. Дубинина д-р физ.-мат. наук (Кыргызский государственный технический университет им. И. Разакова)
Г.О. Котнев д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
С.Д. Кругляков д-р техн. наук (Ижевский государственный технический университет)
А.И. Леонтьев д-р техн. наук, академик РАН (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
С.В. Максимы д-р экон. наук, профессор (Бразильский национальный университет им.Л.Н. Гумилева)

А.П. Марченко академик Академии Высшей школы Украины, д-р техн. наук (Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»)
Ю.В. Подурава д-р техн. наук (МГТУ «Станкин»)
О.А. Риховский д-р техн. наук, профессор (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
С.В. Серебрянников д-р техн. наук (Московский энергетический институт (технический университет))
Г.А. Тимофеев д-р техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
С.Г. Фалько д-р экон. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
В.М. Хрусталева академик НАН Беларуси, д-р техн. наук (Белорусский национальный технический университет)
Е.В. Шахматов д-р техн. наук (Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва)
Yves Faurelle Dr.-Phys., Prof. (Grenoble Institute of Technology)
Wang Shuang Prof., President of Harbin Institute of Technology
Nguyen Kong Dln Dr. Sc. (Eng.), Prof. (Le Quy Don Vietnam State Technical University)
Alison McMillan Prof., Wexham, Great Britain
Marco Cascarelli Prof., Director of the Laboratory of Robotics and Mechatronics at the Casino University

Отмечено в ООО «Книга по требованию» 107078, Москва, Мясницкий пр., д. 4, стр. 1
В оформлении использованы шрифты Студии Артемия Лебедева

Содержание

К 100-летию со дня рождения В.И. Феодосева (1916–1991).....	3
Расчет и конструирование машин	
А.А. Александров, В.С. Зарубин, В.Н. Зимин Термонапряженное состояние оболочки цилиндрического криогенного бака при его заполнении	5
Г.А. Тимофеев, Е.О. Подчасов Исследование заклинивания в зацеплениях несилловых волновых передач	16
Я.А. Дынников К расчету машущего гибкого профиля в потоке вязкой несжимаемой жидкости	22
М.Л. Иоффе Кинематика механизма из трех подвижных звеньев, соединенных шаровыми или плоскими шарнирами ..	31
Транспортное и энергетическое машиностроение	
Г.Г. Анкинович, А.Н. Вержбицкий, М.М. Жилейкин, Г.И. Скотников Разработка принципов повышения устойчивости автопоездов при экстренном торможении в повороте и аварийном отказе тормозной системы прицепных звеньев.....	37
Технология и технологические машины	
А.А. Гемберг, М.А. Прилуцкий Сравнение совмещенной и раздельно-совмещенной схем ультразвукового контроля углепластиков	44
М.А. Шава, В.В. Лапшин, С.В. Грубый Сверхточная обработка хрупких оптических материалов в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя	52
Р.В. Гольдштейн, В.М. Козинцев, Н.М. Осипенко, А.Л. Попов, Д.А. Челюбеев Применение панорамной спекл-интерферометрии при испытаниях на одноосное сжатие призматических пористых образцов	60
Я.И. Солер, Нгуен Ван Ле, Д.Ю. Казимиров Моделирование прижогов при шлифовании закаленных деталей из стали 30ХГСА	71
А.В. Филиппов, А.В. Вальтер, Н.Н. Шапарин, О.А. Подгорных, П.А. Чазов Анализ геометрии косоугольного растачивания безвершинными радиусными резцами в статической и кинематической системах координат.....	82
С.В. Ариичев, А.С. Федюшин Чувствительность вынужденных колебаний рамы с несбалансированным ротором к вариациям жесткостей раскрепления	92

УДК 67.02

DOI 10.18698/0536-1044-2016-4-52-59

Сверхточная обработка хрупких оптических материалов в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя*

М.А. Шавва¹, В.В. Лапшин¹, С.В. Грубый²

¹ ОАО «ВНИИНСТРУМЕНТ», 107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49

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

Ultra-Precision Machining of Brittle Optical Materials in the Nanometer Range of the Cut Layer Thickness

M.A. Shavva¹, V.V. Lapshin¹, S.V. Gruby²

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

² Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman'skaya St., Bldg. 5, Block 1

e-mail: katarpu@mail.ru, vasylap@mail.ru, grusv@yandex.ru

Традиционная технология обработки поверхностей деталей из хрупких оптических материалов предусматривает предварительное шлифование алмазными кругами с зернистостью различного гранулометрического состава в строгой последовательности от крупных до мелких фракций. Далее проводят окончательное химико-механическое полирование микропорошками (свободным абразивом). Однако такая технология имеет существенные недостатки: относительно низкие производительность и стабильность процесса, сложность автоматизации и управления, влияние квалификации полировщика на качество обработки. Специалисты ОАО «ВНИИНСТРУМЕНТ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках Соглашения по федеральной целевой программе проводят комплекс технологических исследований и конструкторских разработок, направленных на повышение производительности, точности и качества обработки хрупких оптических материалов. В основу исследований положена гипотеза о «квазипластичности» хрупких материалов. Анализ экспериментальных данных показал, что при режимах резания, обеспечивающих нанометровые значения толщины срезаемого слоя, поверхностный слой хрупкого материала переходит в состояние «квазипластичности», образуется поверхность без сколов и трещин с шероховатостью в пределах нескольких нанометров.

Ключевые слова: сверхточная обработка, алмазное шлифование, алмазная лезвийная обработка, обработка хрупких материалов, «квазипластичное» резание.

The traditional technology of machining brittle optical materials includes initial grinding of the surfaces by diamond wheels with various granulometric compositions in a strict sequence from coarse to fine fractions. The surfaces are further subjected to chemo-mechanical polishing with classified flours (loose abrasive). This technology has significant drawbacks such as relatively low efficiency and stability of the process, complex automation

* Работа выполнена в рамках Соглашения от 25.08.2014 № 14.579.21.0042 (уникальный идентификатор RFMEFI57914X0042) между ОАО «ВНИИНСТРУМЕНТ» 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».

and control, and the effect of the polisher's skills on the quality of machining. At the Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT and Bauman Moscow State Technical University, technological research and design developments aimed at improving the performance, accuracy and quality of machining of brittle optical materials are performed within the framework of the Agreement on the Federal Target Program. The research is based on the hypothesis of quasi-plasticity of brittle materials. The analysis of the experimental data has shown that when the material is cut at nanometric thicknesses, the surface layer of the brittle material changes into the quasi-plastic state; the surface is formed without chips and cracks, with roughness within a few nanometers.

Keywords: ultra-precision machining, diamond grinding, diamond turning, machining of brittle materials, quasi-plastic cutting.

Цель работы — повышение качества сверхточной лезвийной и абразивной обработки хрупких оптических материалов на основе теоретического и экспериментального обоснования условий и режимов «квазипластичности». Известно, что при стружкообразовании хрупких материалов в условиях обычного резания под действием участка передней поверхности реза, расположенной непосредственно у режущей кромки, образуется система трещин, распространяющихся в направлении движения резания. На этом этапе стружкообразования происходит непрерывное увеличение силы резания, обеспечивающее развитие ведущей равномерно-подвижной трещины. Оно продолжается до тех пор, пока основным параметром, влияющим на процесс формирования стружки, не станет напряжение изгиба, вызывающее быстрое уменьшение силы резания вследствие отделения элемента стружки по поверхности. На втором этапе происходит «зачистка» обработанной поверхности. Этот этап характеризуется отделением мелких элементов стружки по той же схеме.

Таким образом, процесс стружкообразования хрупких материалов при обычном резании определяется явлением хрупкого отрыва, обусловленным периодическим процессом развития опережающей трещины. В этом случае работа стружкообразования пропорциональна поверхности разрушения, о площади которой можно судить по степени измельчения стружки.

Резание, определяемое процессом хрупкого отрыва материала, сопровождается появлением трещиноватого (поврежденного) слоя на обработанной поверхности. При развитии опережающей трещины также образуются микро-трещины, перпендикулярные обработанной поверхности. В зависимости от режимов обработки материала трещиноватый слой может иметь толщину от 100 нм до нескольких мик-

рометров, что снижает качество поверхностей оптических и оптоэлектронных элементов, а также долговечность их работы.

«Квазипластичность» — проявление пластичных свойств поверхностным слоем хрупких оптических материалов при определенных режимах и условиях обработки. При обработке слоев нанометровой толщины контактное взаимодействие инструмента с обрабатываемой поверхностью создает условия, при которых происходит направленное «квазипластичное» удаление поверхностного слоя материала с формированием шероховатости в пределах нескольких нанометров и минимальным трещиноватым слоем.

Первая установка для исследования процессов при алмазном шлифовании в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя была разработана Ешиоко [1]. В 80-х годах XX века Т.Г. Бифано и Т.А. Доу продолжили эти исследования на установке PEGASUS [1]. В результате экспериментов, проведенных на большом количестве аморфных стекол, монокристаллов и керамических материалов, авторами было установлено условие хрупкопластичного перехода, при котором материалы независимо от их твердости и хрупкости в процессе механической поверхностной обработки претерпевают переход от хрупкого режима разрушения к «квазипластичному» [2–5]. Таким условием является обеспечение толщины срезаемого слоя меньше критической. Ниже приведены примерные значения критической толщины для различных хрупких материалов [1], нм:

Кварцевое стекло (SiO ₂)	11
Германий монокристаллический	50
Кремний монокристаллический	70
Оптическое стекло	3
Ситалл	60

Для обеспечения условий резания материала в «квазипластичном» режиме алмазный моно-

кристаллический инструмент должен иметь радиус округления кромки, равный нескольким десяткам нанометров, и радиус вершины лезвия $r = 0,2 \dots 5$ мкм.

При резании материалов в «квазипластичном» режиме передний угол инструмента задан нулевым или отрицательным. Увеличение давления в зоне контакта режущего инструмента и заготовки позволяет создать пластическую деформацию срезаемого слоя и обеспечить переход материала из хрупкого состояния в «квазипластичное». Радиус округления режущей кромки (в сечении главной секущей плоскостью) должен быть соизмерим с толщиной срезаемого слоя и составлять десятки нанометров. С уменьшением радиуса округления режущей кромки стружка надлома переходит в сливную.

Радиус вершины лезвия инструмента непосредственно влияет на толщину срезаемого слоя: с его увеличением при работе в определенных фиксированных режимах резания толщина срезаемого слоя уменьшается (рис. 1), стружка также меняет вид и становится сливной.

При обработке поверхности материала односторонней алмазной фрезерной головкой толщины срезаемого слоя определяют по формуле

$$a = r - \sqrt{r^2 + S^2 - 2S\sqrt{2rt - t^2}}, \text{ мкм},$$

где r — радиус вершины лезвия алмазного монокристаллического режущего инструмента,

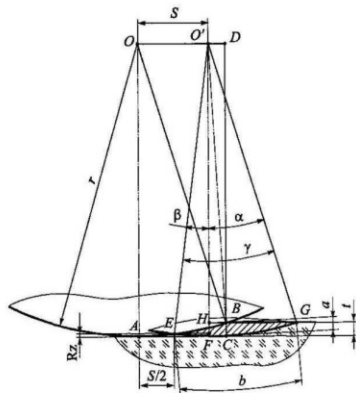


Рис. 1. Схема для расчета толщины срезаемого слоя при обработке поверхности материала алмазным лезвийным инструментом

мкм; S — линейная подача режущего инструмента, мкм/об; t — глубина резания, мкм.

В табл. 1 приведены зависимости толщины срезаемого слоя от режимных параметров процесса и радиуса вершины лезвия алмазного монокристаллического реза.

Из табл. 1 следует, что толщина срезаемого слоя и вид стружки зависят от режимов обработки: с уменьшением глубины резания и подачи и с увеличением радиуса вершины инструмента стружка становится сливной. Критерий перехода от стружки скалывания к сливной при обработке крупных материалов можно считать критерием перехода резания в режим «квазипластичности» [6].

Для обеспечения условий алмазного шлифования в «квазипластичном» режиме алмазные круги должны иметь зернистость алмазоносного слоя от 0,5 до 5 мкм.

Малая зернистость алмазоносного слоя позволяет локализовать зону высокого давления за счет режущих кромок на алмазном зерне, радиус которых составляет 0,07...0,12 диаметра алмазного зерна.

При чистовой обработке шлифованием необходимо обеспечить такой режим работы круга, когда на алмазных зернах будет преобладать механизм адгезионного и диффузионного изнашивания. Применение механизма изнашивания круга с вылетом зерен из связки или их раскалыванием в связке, приводящего к быстрому размерному изнашиванию инструмента, недопустимо. Алмазные круги должны быть изготовлены на металлической или органической связке, обеспечивающей достаточную прочность для закрепления зерен.

При шлифовании на толщину срезаемого слоя влияют концентрация и зернистость алмазных зерен, а также режимы обработки материала (рис. 2).

Таблица 1
Значения толщины срезаемого слоя, получаемые при алмазном лезвийном инструменте

$r = 4 \text{ мкм}, t = 2 \text{ мкм}$						
$S, \text{ мкм/об}$	1	2	4	8	12	24
$a, \text{ мкм}$	0,03	0,06	0,12	0,24	0,36	0,68
$S = 2 \text{ мкм/об}, t = 5 \text{ мкм}$						
$r, \text{ мм}$	0,2	1,0	2,0	4,0	5,0	—
$a, \text{ мкм}$	0,43	0,20	0,14	0,10	0,09	—



Рис. 2. Схема для расчета толщины срезаемого слоя единичным зерном при шлифовании

При шлифовании материала толщину слоя, срезаемого алмазным кругом за один оборот, рассчитывают по формуле

$$a = S \sin \left(\arccos \frac{R_{тп} - t}{R_{тп}} \right), \text{ мкм},$$

где $R_{тп}$ — радиус траектории движения алмазных зерен, мкм.

В табл. 2 приведены зависимости толщины слоя, срезаемого алмазным кругом за один оборот, от режимных параметров и радиуса траектории, описываемой алмазными зернами.

Как видно из табл. 2, на толщину слоя, срезаемого алмазным кругом за один оборот, влияют подача режущего инструмента, а также радиус траектории, описываемой единичными зернами. При увеличении радиуса траектории толщина срезаемого слоя уменьшается. Использование специальной кинематической схемы алмазного шлифования позволяет менять радиус траектории, описываемый единичными зернами, в широком диапазоне и тем самым влиять на толщину срезаемого слоя.

Таблица 2
Значения толщины срезаемого слоя, получаемые при алмазном шлифовании

$R_{тп} = 80 \text{ мм}, t = 2 \text{ мкм}$						
$S, \text{ мкм/об}$	0,5	1	2	4	8	16
$a, \text{ мкм}$	0,004	0,007	0,014	0,028	0,057	0,113
$S = 4 \text{ мкм/об}, t = 5 \text{ мкм}$						
$R_{тп}, \text{ мм}$	50	100	200	400	800	—
$a, \text{ мкм}$	0,036	0,025	0,018	0,013	0,009	—

Исследования по алмазному шлифованию и обработке односторонней алмазной фрезерной головкой проведены на экспериментальном сверхточном четырехосевом станде [5], основные параметры которого приведены ниже:

Частота вращения шпинделя, об/мин:	
n_1 инструмента	50...1500
n_2 заготовки	0,05...500
Скорость подачи поперечного суппорта S_2 , мм/мин	1,5...20
Дискретность перемещения суппорта врезания t , мм	10

Для контроля шероховатости обработанных поверхностей использовали микроскоп $\mu\text{Surf NanoFocus AG}$, работающий по принципу конфокального измерения с источником белого света и обеспечивающий измерение шероховатости с точностью до 1 нм.

Кинематическая схема обработки поверхности заготовки лезвийным инструментом на экспериментальном станде приведена на рис. 3.

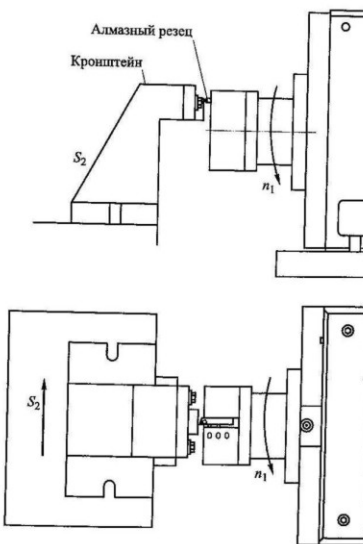


Рис. 3. Кинематическая схема обработки поверхности заготовки односторонней алмазной фрезерной головкой

Объектами исследования при алмазной лезвийной обработке являлись заготовки из монокристаллических дигидрофосфата калия (KDP) и германия. Алмазный монокристаллический резец, установленный во фрезерную головку, имел следующие параметры: радиус округления режущей кромки — 50 нм, передний угол — 0° , задний угол — 7° . Диаметр однорезцовой головки составил 95 мм. Все эксперименты проведены при частоте вращения шпинделя $n_1 = 1000$ об/мин, глубине резания $t = 1$ мкм, продольной подаче заготовки $S_2 = 2,5$ мм/мин и частоте вращения заготовки $n_2 = 0$. Параметры лезвийной обработки и значения шероховатости обработанной поверхности приведены в табл. 3.

На рис. 4 показан внешний вид поверхностей оптических материалов, обработанных однорезцовой алмазной фрезерной головкой.

Из рис. 4 следует, что при уменьшении толщины срезаемого слоя до 5,6 нм на обработанной поверхности четко видны «следы подачи» режущего инструмента [6–8]. С уменьшением толщины срезаемого слоя снижается шероховатость обработанной поверхности. Элементы оптики и микроэлектроники из KDP и германия могут быть обработаны алмазным монокристаллическим инструментом с шероховатостью оптического класса [9–13].

Объектами исследования при алмазном шлифовании являлись заготовки из ситалла марки СО-115М. Обработку заготовок проводили по специальной кинематической схеме [14] при глубине резания $t = 5$ мкм, частоте вращения шлифовального круга $n_1 = 1000$ об/мин, частоте вращения заготовки $n_2 = 30$ об/мин.

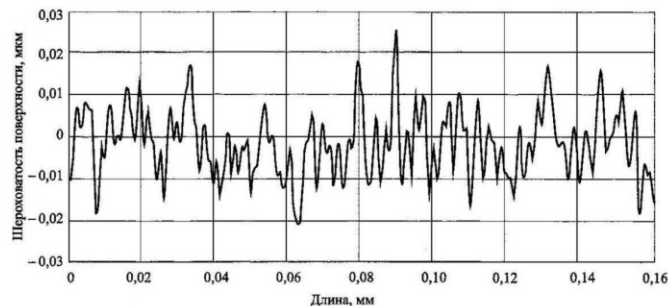


Рис. 5. Результаты измерения шероховатости заготовки из ситалла СО-115М после алмазного шлифования

Таблица 3

Результаты экспериментов по алмазной лезвийной обработке				
Обрабатываемый материал	Радиус алмазного реза при вершине, мм	Толщина срезаемого слоя, нм	Число проходов	Ra, нм
KDP	2	77,4	3	12
	2	31,3	8	16
Германий монокристаллический	2	5,6	3	3
	3,6	5,6	3	1

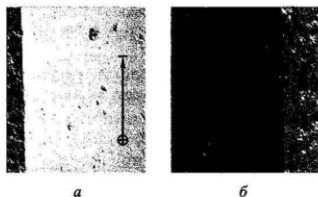


Рис. 4. Поверхности образцов после лезвийной алмазной обработки при толщине срезаемого слоя 5,6 нм (масштаб 250:1): а — KDP; б — германий

Линейная подача S_2 инструмента составила 3 мм/мин, что соответствует 3 мкм/об.

Обработка проведена алмазным шлифовальным кругом диаметром 80 мм и зернистостью 1–3 мкм со 100%-ной концентрацией алмазных зерен на керамической связке без применения смазочно-охлаждающей жидкости.

На рис. 5 приведена диаграмма измерения шероховатости заготовки из ситалла.

Внешний вид обработанной поверхности заготовки из ситалла показан на рис. 6. На поверхности отсутствуют хрупкие сколы, четко видны «следы подачи» режущего инструмента.

Выводы

1. При алмазной обработке лезвийным монокристаллическим и абразивным инструментами хрупких оптических материалов можно создать условия для резания в режиме «квазипластичности». Такой режим позволяет получить нанометровую шероховатость поверхности, что соответствует оптическому классу обработки. Отличительными особенностями обработки в режиме «квазипластичности» являются: отсутствие хрупких сколов и трещин, видимые на поверхности «следы подачи» режущего инструмента, а также стружка перенесенной нанометровой толщины.

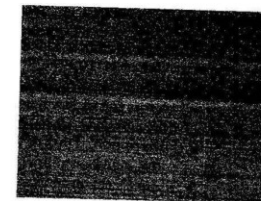


Рис. 6. Внешний вид обработанной поверхности заготовки из ситалла СО-115М (масштаб 100:1)

2. Результаты исследований можно использовать при моделировании процессов лезвийной и абразивной наноразмерной обработки для оптимизации условий и повышения производительности, в том числе с использованием многокоординатного сверточного станка нового поколения.

Литература

- [1] Bifano T., Dow T., Scattergood R. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Journal of engineering for industry*, 1991, vol. 113, no. 2, pp. 184–189.
- [2] Теплова Т.Б. Квазипластичное удаление поверхностного слоя твердых хрупких материалов с получением нанометрового рельефа поверхности. *Научный вестник МГТУ*, 2010, № 8, с. 73–88.
- [3] Nazwa T. Precision surface grinding of silicon carbide with fine grain diamond cup wheel. *Engineering e-Transaction*, 2010, vol. 5, no. 1, pp. 19–26.
- [4] Шейнман Е. Пластичное резание хрупких материалов в нанодиапазоне. Обзор зарубежных исследований. *Инструменты. Технология. Оборудование*, 2007, № 12, с. 54–56.
- [5] Shavva M.A., Lapshin V.V., Grubyy S.V. Processing of brittle materials in the nanometer range of thickness of layers cut. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, no. 1, pp. 12062–12068, doi:10.1088/1757-899X/91/1/012062.
- [6] 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 machine tool and manufacture*, 2013, no. 65, pp. 15–21.
- [7] Shavva M.A., Grubyy S.V. Cutting Forces Calculation at Diamond Grinding Of Brittle Materials. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 163–168, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.163.
- [8] Shariff Udin M., Seah K.H.W., Li X.P., Rahman M., Liu K. Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon. *Elsivier*, 2004, pp. 751–759.
- [9] Prasad Pawase, Brahmankar P.K., Pawade R.S., Balasubramaniam R. Analysis of Machining Mechanism in Diamond Turning of Germanium Lenses. *Procedia Materials Science*, 2014, no. 5, pp. 2363–2368.
- [10] Wang J., Fang F., Zhang X. An experimental study of cutting performance on monocrystalline germanium after ion implantation. *Precision Engineering*, 2015, no. 39, pp. 220–223.
- [11] Грубый С.В., Лапшин В.В. Моделирование процесса и разработка технологии сверхточной обработки плоских отражателей однорезцовой алмазной фрезерной голов-

- кой. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 2. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/699743.html>, doi: 10.7463/0214.0699743.
- [12] Evans J., Rhorer L. *Fabrication of optics by diamond turning*. Chapter 41 in *Handbook of Optics*, 2nd, II, 1995.
- [13] Chen H., Dai Y., Zheng Z., Gao H., Li X. Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals. *Machining Science and Technology*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 231–242.
- [14] Шавва М.А., Грубый С.В. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 11. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/731997.html>, doi: 10.7463/1114.0731997.

References

- [1] Bifano T., Dow T., Scattergood R. Ductile-regime grinding: a new technology for machining brittle materials. *Journal of engineering for industry*, 1991, vol. 113, no. 2, pp. 184–189.
- [2] Teplova T.B. Kvaziplastichnoe udalenie poverkhnostnogo sloia tverdykh khrupkikh materialov s polucheniem nanometrovoogo rel'efa poverkhnosti [The method of quasi-plastic grinding of a solid brittle material intended for getting a surface with nanometric relief roughness]. *Nauchnyi vestnik MGGU* [Scientific Bulletin MSMU]. 2010, no. 8, pp. 73–88.
- [3] Nazwa T. Precision surface grinding of silicon carbide with fine grain diamond cup wheel. *Engineering e-Transaction*, 2010, vol. 5, no. 1, pp. 19–26.
- [4] Sheinman E. Plastichnoe rezanie khrupkikh materialov v nanodiazpazone. Obzor zarubezhnykh issledovaniy [Plastic cutting brittle materials at the nanoscale. Review of Foreign Studies]. *Instrumenty. Tekhnologiya. Oborudovanie* [Tools. Technology. Equipment]. 2007, no. 12, pp. 54–56.
- [5] Shavva M.A., Lapshin V.V., Grubyy S.V. Processing of brittle materials in the nanometer range of thickness of layers cut. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 91, no. 1, pp. 12062–12068, doi:10.1088/1757-899X/91/1/012062.
- [6] 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 machine tool and manufacture*, 2013, no. 65, pp. 15–21.
- [7] Shavva M.A., Grubyy S.V. Cutting Forces Calculation at Diamond Grinding Of Brittle Materials. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 770, pp. 163–168. Doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.770.163.
- [8] Shariff Udin M., Seah K.H.W., Li X.P., Rahman M., Liu K. *Effect of crystallographic orientation on wear of diamond tools for nano-scale ductile cutting of silicon*. Elsevier, 2004, pp. 751–759.
- [9] Prasad Pawase, Brahmankar P.K., Pawade R.S., Balasubramanium R. Analysis of Machining Mechanism in Diamond Turning of Germanium Lenses. *Procedia Materials Science*, 2014, no. 5, pp. 2363–2368.
- [10] Wang J., Fang F., Zhang X. An experimental study of cutting performance on monocrystalline germanium after ion implantation. *Precision Engineering*, 2015, no. 39, pp. 220–223.
- [11] Grubyy S.V., Lapshin V.V. Modelirovanie protsessa i razrabotka tekhnologii sverkhtochnoi obrabotki ploskikh otrazhatelei odnoreztovoi almaznoi frezernoii golovkoi [Process modeling and ultra-precision machining technology development for flat reflectors using a diamond milling head]. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 2. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/699743.html>, doi: 10.7463/0214.0699743.
- [12] Evans J., Rhorer L. *Fabrication of optics by diamond turning*. Chapter 41 in *Handbook of Optics*, 2nd, II, 1995.
- [13] Chen H., Dai Y., Zheng Z., Gao H., Li X. Effect of crystallographic orientation on cutting forces and surface finish in ductile cutting of KDP crystals. *Machining Science and Technology*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 231–242.
- [14] Shavva M.A., Grubyy S.V. Analiz vzaimosvyazi iznosa kruga i sil rezaniya pri almaznom shlifovanii [Analysing a Relationship between Wheel Wear and Cutting Forces during Di-

mond Grinding]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2014, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/731997.html>, doi: 10.7463/1114.0731997.

Статья поступила в редакцию 25.01.2016

Информация об авторах

ШАВВА Мария Александровна (Москва) — инженер-конструктор ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: kataru@mail.ru).

ЛАПШИН Василий Владимирович (Москва) — инженер-технолог ОАО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» (107023, Москва, Российская Федерация, Большая Семеновская ул., д. 49, e-mail: vasylap@mail.ru).

ГРУБЫЙ Сергей Витальевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Инструментальная техника и технологии». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

Information about the authors

SHAVVA Mariya Aleksandrovna (Moscow) — Design Engineer. Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49, e-mail: kataru@mail.ru).

LAPSHIN Vasily Vladimirovich (Moscow) — Process Engineer. Russian Research and Development Tooling Institute VNIINSTRUMENT (107023, Moscow, Russian Federation, Bolshaya Semenovskaya St., Bldg. 49, e-mail: vasylap@mail.ru).

GRUBYY Sergey Vitalievich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Instrumental Equipment and Technology. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: grusv@yandex.ru).

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
**Г.А. Бигуса, Ю.Ф. Даниева, Н.А. Быстровой,
Д.И. Галкина**
**«Основы диагностики технических устройств
и сооружений»**

В монографии приведены основные понятия технической диагностики — области знаний, охватывающей теорию, методы и средства определения технического состояния объектов. Значительное внимание уделено методам неразрушающего контроля, правильное применение которых позволяет получить исходные данные для анализа, проводимого при техническом диагностировании. Изложены элементы теории надежности и методы расчета показателей надежности в приложении к технической диагностике. Рассмотрены вопросы идентификации состояния объекта по измеренным диагностическим параметрам и оценки его ресурса.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru

ОСНОВЫ
ДИАГНОСТИКИ
ТЕХНИЧЕСКИХ
УСТРОЙСТВ
И СООРУЖЕНИЙ