

На правах рукописи
УДК 621.914

Шавва Мария Александровна

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЭЛЕМЕНТОВ ПРИБОРОВ АЛМАЗНЫМ ШЛИФОВАНИЕМ НА СВЕРХТОЧНЫХ
СТАНКАХ

Специальность:
05.02.07- Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в Московском государственном техническом
университете им. Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Сергей Витальевич Грубый

Официальные оппоненты: Волков Дмитрий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой мехатронных
систем и процессов формообразования
имени С.С. Силина ФГБОУ ВО «Рыбинский
государственный авиационный
технический университет имени П.А.
Соловьева»

Исаев Александр Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры инструментальной техники и
технологий формообразования ФГБОУ ВО
«Московский государственный технический
университет «СТАНКИН»

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Российский университет
транспорта (МИИТ)»

Защита состоится _____ 2018 г. в _____ час. на заседании
диссертационного совета Д 212.141.06 при Московском государственном
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я
Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью
организации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.
Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8(499)267-09-63.

Автореферат разослан «_____» _____ 2017г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
д.т.н., доцент



В.П. Михайлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В составе современных изделий машиностроения, авиакосмической, оптико-механической и электронной промышленности широкое применение находят элементы приборов из изотропных оптических материалов: отражатели, резонаторы, подложки измерительных шкал и др. К таким элементам приборов можно отнести диэлектрические зеркала резонаторов лазерных гироскопов. Качество обработки оптических поверхностей зеркал влияет на долговременную стабильность лазерных гироскопов и точность работы навигационной системы.

Традиционная технология обработки элементов приборов из изотропных оптических материалов предусматривает обработку последовательно связанным, а затем свободным абразивом - химико-механическое полирование в среде полировальной суспензии. К основным недостаткам такой технологии относятся: возникновение поврежденного слоя обработанной поверхности; шаржирование обработанной поверхности абразивными частицами; низкая производительность процесса полирования оптических поверхностей. Для изменения технологии, сокращения или исключения операций полирования, травления и ионно-лучевой обработки предлагается использовать алмазное шлифование на сверхточных станках. Однако для алмазного шлифования остается открытым вопрос о возможности достижения предельных требований по качеству обработки. Существующие математические модели процессов алмазного шлифования изотропных оптических материалов не позволяют использовать их для прикладных расчетов, т.к. в них не учитываются закономерности физических процессов, протекающих в зоне резания, а также отсутствует методика расчета глубины трещиноватого слоя. Кроме того, не описана методика контроля глубины трещиноватого слоя при финишной обработке оптических материалов.

Для решения проблемы повышения качества оптических поверхностей элементов приборов и производительности обработки актуальной является задача по разработке математической модели процесса, которая позволит рассчитать параметры зоны резания, выходные показатели качества обработанной поверхности, режимные параметры, стойкость инструмента и теоретически обосновать использование финишного метода алмазного шлифования на сверхточных станках. Разработанная модель также позволит сформулировать технические требования к сверхточному оборудованию для практической реализации финишного метода алмазного шлифования.

Целью диссертационной работы является уменьшение шероховатости и глубины трещиноватого слоя оптических поверхностей элементов приборов из ситалла и кварцевого стекла за счет использования алмазного шлифования на сверхточных станках.

Задачи работы:

1. Разработать математическую модель процесса алмазного шлифования изотропных оптических материалов для получения расчетных зависимостей сил резания, шероховатости и глубины трещиноватого слоя обработанной поверхности от режимов резания, параметров алмазноносного слоя круга и свойств обрабатываемого материала;

2. Разработать методики и провести экспериментальные исследования для проверки расчетных зависимостей сил резания, шероховатости и глубины

трещиноватого слоя, и выполнить контроль параметров качества оптических поверхностей;

3. Создать сверхточный экспериментальный стенд для проведения исследований по алмазному шлифованию образцов из ситалла и кварцевого стекла с преобладающим механизмом пластического деформирования материала, технические характеристики которого будут использованы при разработке технического задания на сверхточный станок;

4. Разработать специальные алмазные круги для обработки оптических поверхностей деталей из ситалла и кварцевого стекла, обеспечивающие возможность достижения показателей качества исполнительных поверхностей, предусмотренных нормативной технологической документацией - шероховатость Ra 10 нм и глубина трещиноватого слоя 50 нм и менее;

5. Разработать сверхточный станок и технологические рекомендации по обработке оптических поверхностей, обеспечить повышение качества и снижение трудоемкости обработки.

Научная новизна:

1) Установлено, что минимальная шероховатость и глубина трещиноватого слоя достигается при обеспечении перехода от хрупкого разрушения к пластическому деформированию обрабатываемого изотропного оптического материала алмазным зерном. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены условия этого перехода по предельным нагрузкам и толщине срезаемого слоя;

2) Доказано, что предельные требования по качеству обработки достигаются при использовании схемы плоского шлифования с разворотом оси круга, которая позволяет регулировать толщину срезаемого слоя единичным зерном, управлять направлением распространения трещин и обеспечивает минимальную глубину трещиноватого слоя;

3) Установлены рациональные соотношения между свойствами связки инструмента, алмазного зерна и силами резания, действующими на единичное зерно, которые позволяют одновременно обеспечить условия прочности связки и зерна, и расчетную стойкость круга;

4) Разработаны методики: экспериментальных исследований по выбору эксплуатационных параметров абразивного алмазного инструмента для работы на сверхточных станках; для проверки расчетных зависимостей сил резания, шероховатости и глубины трещиноватого слоя; для контроля шероховатости и глубины трещиноватого слоя оптических поверхностей деталей из изотропных оптических материалов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что:

1) Разработаны функциональные связи между характеристиками абразивного алмазного инструмента и свойствами обрабатываемого изотропного оптического материала: твердостью, прочностью, трещиностойкостью, эффективной поверхностной энергией, которые позволяют определить рациональные режимные параметры процесса шлифования и выходные показатели качества обработанной поверхности – шероховатость и глубину трещиноватого слоя;

2) Разработаны математические зависимости, характеризующие параметры зоны шлифования, которые позволяют рассчитать длину и площадь контакта круга и заготовки, число режущих зерен, толщину срезаемого слоя, шероховатость обработанной поверхности. Теоретически

обосновано использование кинематической схемы с наклоном оси шлифовального круга.

3) На основании выявленных и систематизированных функциональных и математических зависимостей разработана программа ЭВМ «Расчет параметров процесса наноразмерной обработки хрупких материалов алмазным шлифованием», которая позволяет рассчитать параметры зоны резания при шлифовании, силы резания, шероховатость поверхности, глубину трещиноватого слоя и др. Программа ЭВМ прошла государственную регистрацию.

Практическая значимость работы:

1) Разработаны технологические рекомендации по обработке оптических поверхностей подложки диэлектрического зеркала резонатора кольцевого лазерного гироскопа, включающие использование схемы плоского шлифования периферией с наклоном оси круга на сверхточном станке на следующих режимах резания: глубина резания 1...5 мкм, скорость шлифования 10...15 м/с, скорость продольной подачи заготовки 0,025...0,06 м/мин, скорость поперечной подачи круга 0,0004...0,0006 м/мин, а также использование специального шлифовального круга с конической фаской. Реализована возможность алмазного шлифования оптических поверхностей деталей из ситалла и кварцевого стекла с шероховатостью Ra 10 нм и глубиной трещиноватого слоя 50 нм и менее.

2) Создан сверхточный экспериментальный стенд для проведения исследований по алмазному шлифованию ситалла и кварцевого стекла с использованием схемы с наклоном оси шлифовального круга, реализующий возможность шлифования по механизму пластичного деформирования материала с предельно малой глубиной трещиноватого слоя;

3) Разработаны и обоснованы результатами экспериментальных исследований на сверхточном экспериментальном стенде технические и технологические требования к оборудованию и алмазному шлифовальному инструменту для реализации финишной обработки оптических поверхностей деталей из ситалла и кварцевого стекла;

4) Разработаны конструкции специальных алмазных кругов с зернистостью алмазоносного слоя $2/3$ мкм на металлической и органической связке. Проведены сравнительные испытания кругов, изготовленных по традиционной технологии и по технологии нанесения многослойного композиционного электролитического покрытия;

5) Разработан и создан сверхточный станок с биением поверхностей шпиндельных узлов не более 0,1 мкм и жесткостью не менее 400 Н/мкм, который реализует схему плоского шлифования периферией с наклоном оси круга.

Методология и методы. Работа включает в себя теоретические и экспериментальные методы исследования и моделирование на ЭВМ. Используются основные положения теории шлифования материалов, механики разрушения твердого тела, методы теории вероятности и математической статистики, элементы теории инженерного эксперимента и др. Алгоритмизация и верификация математической модели алмазного шлифования изотропных оптических материалов проведена с использованием метода объектно-ориентированного программирования в среде Turbo Delphi 7. Разработка конструкций узлов и систем сверхточного экспериментального стенда, а также специальных алмазных кругов и

сверхточного станка выполнена с помощью программного комплекса САПР SolidWorks. Экспериментальные исследования по алмазному шлифованию поверхностей деталей из ситалла и кварцевого стекла выполнены, в том числе на сверхточном экспериментальном стенде. В исследованиях использован микроскоп Zeiss Axio Imager Z2 и трехкомпонентный динамометр Kistler модели 9257B. Исследования шероховатости обработанной поверхности проводились контактными и оптическими методами с использованием портативного профилометра Mitutoyo SurfTest SJ-210 и оптического профилометра модели Talysurf CCL 600. Глубина трещиноватого слоя оценивалась методом ионно-лучевого травления с использованием нанотехнологического комплекса HeliosNanolab и сканирующего электронного микроскопа Tescan Mira 3 LM по разработанным методикам.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Математические уравнения, описывающие функциональные связи между входными переменными, характеризующими обрабатываемый изотропный оптический материал (твердость, прочность, трещиностойкость, эффективная поверхностная энергия, модуль упругости), параметрами зерна и алмазносносного слоя шлифовальных кругов, режимными параметрами процесса шлифования и выходными показателями качества обработанной поверхности – шероховатостью и глубиной трещиноватого слоя;

2) Методики и результаты экспериментальных исследований и метрологического контроля поверхностей образцов из ситалла и кварцевого стекла, подтверждающие достижение минимальной шероховатости и глубины трещиноватого слоя при алмазном шлифовании с преобладающим механизмом пластичного деформирования материала;

3) Технологические рекомендации по характеристикам алмазных кругов и режимам резания, обеспечивающие повышение производительности обработки и качества оптических поверхностей элементов приборов из ситалла и кварцевого стекла;

4) Разработанные и обоснованные методом математического моделирования технические и технологические требования на сверхточный станок, позволяющие реализовать финишный метод плоского алмазного шлифования, в том числе с разворотом оси круга, который обеспечивает механизм пластичного деформирования материала в зоне резания, его обработку с шероховатостью Ra не более 10 нм и глубиной трещиноватого слоя не более 50 нм.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки: пункту 2 - моделирование процесса алмазного шлифования оптических изотропных материалов; пункту 3 - исследование процесса алмазного шлифования оптических изотропных материалов с целью определения параметров оборудования, обеспечивающего повышение производительности и качества обработки; пункту 4 - создание инструмента, обеспечивающего алмазное шлифование оптических изотропных материалов.

Достоверность результатов. Достоверность полученных научных результатов основывается на рационально выбранных и примененных методах научного исследования, подтверждается экспериментальной проверкой результатов теоретического моделирования и использованием аттестованных приборов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: Седьмой всероссийской конференции «Будущее машиностроения России» (Москва, 2014); Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий» (Уфа, 2015); Специализированной научно-практической конференции «Инновационные оптические технологии для изготовления оптико-электронных приборов и комплексов» в рамках XI международного форума «Оптические системы и технологии – Optics-Expo 2015» (Москва, 2015); Научно-практической конференции V Конгресса ТП «Фотоника» в рамках выставки «Фотоника. Мир лазеров и оптики 2016» (Москва, 2016); на научных семинарах кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2013-2017 г. г.

Результаты работы внедрены при выполнении:

1) Соглашения о предоставлении субсидии №14.579.21.0042 «Разработка технологии и оборудования наноразмерной обработки алмазным монокристаллическим и абразивным инструментом оптических материалов в режиме квазипластичного резания» между АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и Министерством науки и образования РФ, заключенного в рамках Федеральной Целевой Программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»;

2) Контракта №555/145 от 05.08.2014 по теме «Создание стенда для ультрапрецизионной финишной обработки элементов мишеней» между АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров);

3) Договора № КС-32/8108/2016 от 17.06.2016 по теме «Разработка и изготовление образцов подложек шкал и дифракционных решеток для экспериментального образца ультрапрецизионного голографического датчика линейных перемещений» между АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 11 научных работах, из которых 7 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ. Получено свидетельство о государственной регистрации на программу ЭВМ для расчета параметров процесса алмазного шлифования хрупких материалов.

Структура и объем работы. Диссертация включает в себя введение, пять глав, список обозначений, список литературы и приложение. Работа содержит 184 страницы машинописного текста, в том числе 153 страницы текста, 71 рисунок, 17 таблиц, список литературы из 89 наименований и приложение на 13 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, содержится описание цели, решаемых задач, методов исследования, формулируется научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе содержится анализ требований к качеству и особенности технологии обработки оптических поверхностей элементов приборов из изотропных оптических материалов. Подложка диэлектрического зеркала резонатора лазерного гироскопа представляет собой круглую

пластину диаметром 24-30 мм и толщиной 6 мм, шероховатость оптических поверхностей не должна превышать Ra 10 нм, Rz 50 нм, глубина трещиноватого слоя - не более 50 нм. По статистике 90% подложек зеркал изготавливают из ситалла СО115М по ОСТ 3-104-77, остальные - из кварцевого стекла КУ1 ГОСТ 15130-86.

Проведенный анализ литературных источников выявил, что основными недостатками типового техпроцесса изготовления подложек диэлектрических зеркал являются высокая трудоемкость (более 12 часов) и наличие трещиноватого слоя обработанной поверхности глубиной 500 нм и более. Так, при обработке оптической поверхности подложки, более 80% трудозатрат составляют операции полирования. Для повышения производительности механической обработки оптических поверхностей и определения режимов обработки изотропных оптических материалов с минимальной глубиной трещиноватого слоя необходимо разработать математическую модель процесса алмазного шлифования, связывающую выходные показатели: силы резания, шероховатость и глубину трещиноватого слоя, с режимами резания, параметрами поверхности алмазоносного слоя круга и свойствами обрабатываемого материала. Разработкой модели процесса алмазного шлифования и исследованием процессов в зоне резания занимались Хрульков В.А., Резников А.Н., Байкалов А.К., Островский В.И., Попов С.А., Малевский Н.П., Маслов Е.Н. Различные аспекты обработки оптических материалов изучали Маринеску И.Д., Бифано Т., Лон Б.Р., Теплова Т.Б., Калафатова Л.П., Липатова Л.П., Балыков А.В., Рёбенах О. Процессы разрушения хрупких материалов и трещинообразования исследовали Черепанов Г.П., Морозов Е.М., Боуден Ф.П., Эванс А и др. Физическая модель образования трещин в изотропных материалах описана в отечественной и зарубежной литературе. Процессы, протекающие при шлифовании, упрощенно представляются в виде взаимодействия сферического индентора и поверхности обрабатываемого материала со следующей последовательностью распространения трещин: 1) при приложении нагрузки имеющиеся на поверхности материала микротрещины начинают распространяться под углом $20...50^\circ$ и перерастают в поверхностную трещину; 2) при увеличении нагрузки кольцевая трещина распространяется вглубь тела перпендикулярно поверхности и переходит в медианную, при достижении критического значения нагрузки медианная трещина «страгивается», т.е. входит в стадию неустойчивого роста, приводящего к появлению конической трещины; 3) при разгрузке индентора происходит «выламывание» материала по образованным боковым трещинам.

Условие «страгивания» трещины отмечается достижением критической нагрузки по выражению (1) и критической длины трещины по выражению (2). Выражения (1) и (2) получены эмпирически в работах Б. Лауна:

$$P_{krit} = \frac{54,47\xi}{\eta^2\theta^4} \left(\frac{K_c}{HV} \right)^3 K_c, \text{ [Н];} \quad (1) \quad C_{mkrit} = \frac{1,767}{\theta^2} \left(\frac{K_c}{HV} \right)^2 \text{ [М],} \quad (2)$$

где K_c - коэффициент трещиностойкости, $\text{Па}\cdot\text{м}^{1/2}$; HV - твердость обрабатываемого материала, Па. Эмпирические параметры зависят от формы индентора, размера поля и интенсивности напряжений и приняты в расчетах: $\xi = \pi/2$, $\eta = 1$, $\theta = 0,2$. Длина медианной трещины после «страгивания» зависит от величины прикладываемой к индентору нормальной

нагрузки F_n , Н, и определяется эмпирическим выражением (3). При этом длина боковой трещины зависит от длины медианной и определяется выражением (4):

$$C_m = \left[\left(\frac{E}{HV} \right)^{1/2} \cdot \frac{1}{K_c} \right]^{2/3} \cdot F_n^{2/3}, \text{ [м];} \quad (3) \quad C_l \approx \frac{C_m}{7}, \text{ [м].} \quad (4)$$

Выражения (1)-(4) позволяют определить условия «страгивания» трещины в оптическом изотропном материале и рассчитать длину трещины при ее последующем распространении. Приведенные эмпирические зависимости использованы при разработке математической модели процесса алмазного шлифования.

Во второй главе разработана математическая модель процесса алмазного шлифования изотропных оптических материалов.

На основании обзора литературных источников, в которых представлены результаты большого количества измерений параметров алмазных зерен из порошков различных фракций, для моделирования поверхности шлифовального круга зерно размером менее 10 мкм представлено в виде сферы с режущим выступом в виде конуса с радиусом округления ρ и углом заострения $\gamma = 85^\circ$.

При обработке оптических изотропных материалов рассмотрено два варианта взаимодействия материала с режущей вершиной алмазного зерна: пластическое деформирование с образованием в зоне контакта пластически деформируемой зоны, и хрупкое разрушение. При хрупком разрушении одновременно протекают процессы пластического деформирования и хрупкого скалывания обрабатываемого материала за счет образования трещин. В этом случае силы резания представляют собой сумму давления обрабатываемого материала на переднюю поверхность зерна, сил трения зерна о поверхность материала и сил трещинообразования.

Иллюстрация работы алмазного зерна при хрупком характере взаимодействия приведена на Рис. 1. Здесь под зоной контакта зерна и материала образуются трещины, часть из которых распространяется в подповерхностном слое – медианные трещины размером C_m , а часть выходит на обрабатываемую поверхность – боковые трещины размером C_l . Активный рост размера трещины происходит при выполнении условия «хрупко-пластичного» перехода. Если нормальная сила, действующая на обрабатываемый материал от единичного зерна при шлифовании, превышает критическое значение по выражению (1), то имеет место хрупкое разрушение материала. Значение критической силы определяется также соответствующей критической толщиной срезаемого слоя на единичное зерно a_{zkrit} , м. Тогда хрупкий характер взаимодействия зерна и материала определяется условием $a_z > a_{zkrit}$, т.е. толщина срезаемого слоя a_z должна быть больше критической, а пластичное деформирование определяется условием $a_z \leq a_{zkrit}$. При пластичном деформировании считаем, что длина медианной трещины определяется по выражению (2).

С учетом условия «хрупко-пластичного» перехода и износа алмазного зерна h_{izn} , м, тангенциальная и радиальная составляющие силы резания, действующие на единичное алмазное зерно, равны:

$$F_{zt} = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{-6} A_t (a_z, h_{izn}) + \mu \sigma_{-6} A_t (a_z, h_{izn}), \quad a_z \leq a_{zkrit}; \\ 2\pi C_L \gamma_s + 2C_m \gamma_s + \sigma_{-6} A_t (a_z, h_{izn}) + \mu \sigma_{-6} A_t (a_z, h_{izn}), \quad a_z > a_{zkrit} \end{array} \right\}, \text{ [H];} \quad (5)$$

$$F_{zn} = \left\{ \begin{array}{l} \sigma_{-6} A_n (a_z, h_{izn}) + \mu \sigma_{-6} A_n (a_z, h_{izn}), \quad a_z \leq a_{zkrit}; \\ 4C_L \gamma_s + \sigma_{-6} A_n (a_z, h_{izn}) + \mu \sigma_{-6} A_n (a_z, h_{izn}), \quad a_z > a_{zkrit} \end{array} \right\}, \text{ [H]} \quad (6)$$

где σ_{-6} - предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Па; A_t , A_n - тангенциальная и нормальная площади сечения алмазного зерна, м²; μ - коэффициент трения между алмазным зерном и обрабатываемым материалом; γ_s - эффективная поверхностная энергия обрабатываемого материала, Н/м.

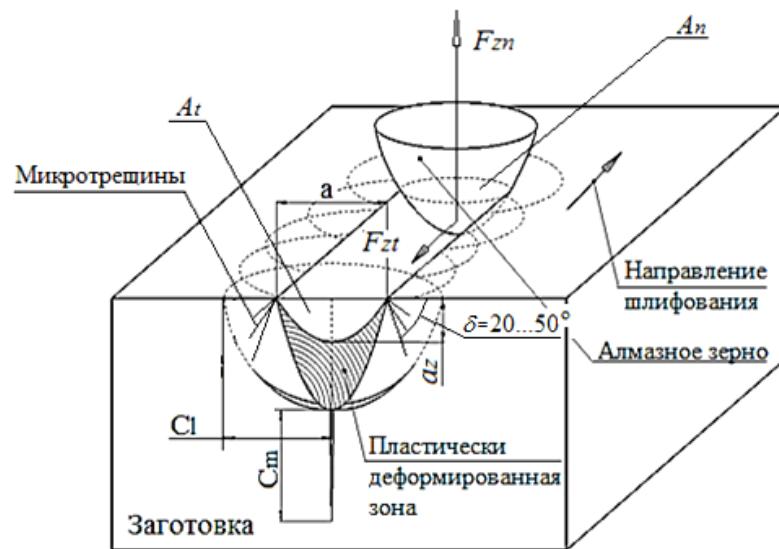


Рис. 1. Схема взаимодействия алмазного зерна и материала

На Рис. 2, а приведен график зависимости нормальной составляющей силы резания единичным зерном размером 8 мкм от толщины срезаемого слоя для ситалла марки СО115М, рассчитанной по выражению (6) с износом зерна $h_{izn} = 630$ нм, иллюстрирующий условие хрупко-пластичного перехода. Нормальная составляющая силы увеличивается с ростом толщины срезаемого слоя и достигает критического значения P_{krit} по выражению (1). Пластический характер взаимодействия заменяется хрупким разрушением материала, происходит скачок нормальной составляющей силы, связанный с появлением сил трещинообразования.

На Рис. 2, б приведены графики зависимости нормальной составляющей силы взаимодействия. Из графиков следует, что при износе зерна более 200 нм под действием нормальной составляющей силы происходит разрушение связки круга, что приводит к выпадению зерен из связки. В диссертационной работе количественно обоснованы оптимальные условия работы алмазного зерна: постепенный износ истиранием с соблюдением прочности связки круга; отсутствие объемного разрушения алмазного зернорезания единичным зерном с различным износом при пластическом характере.

Проведен сравнительный анализ кинематических схем плоского шлифования торцом и периферией круга по показателям: длина и площадь

контакта, число режущих зерен, толщина среза единичным зерном. Предложено для обеспечения условий пластичного деформирования материала и уменьшения глубины трещиноватого слоя использовать схему плоского шлифования периферией с наклоном оси круга относительно оси вращения планшайбы с заготовками. Изменение угла наклона оси круга позволяет регулировать толщину срезаемого слоя единичным зерном, число работающих зерен в контакте и изменять направление распространения трещин.

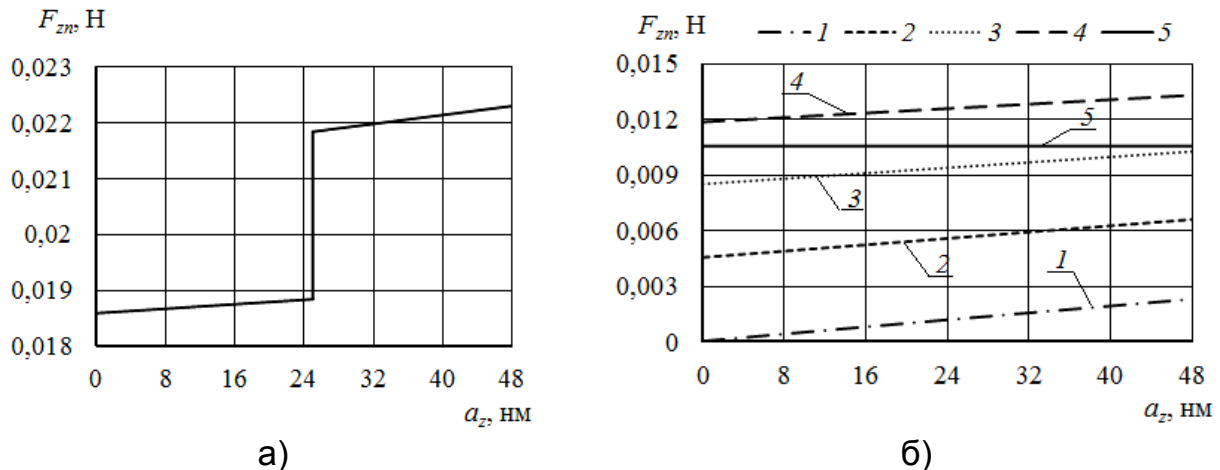


Рис.2. Нормальная составляющая силы резания ситалла алмазным зерном размером 8 мкм в зависимости от толщины срезаемого слоя для различной величины износа: а) $h_{izn} = 630$ нм; б) 1 - $h_{izn} = 0$ нм; 2 - $h_{izn} = 100$ нм; 3 - $h_{izn} = 200$ нм; 4 - $h_{izn} = 300$ нм; 5 - ограничение по прочности связи

Глубина трещиноватого слоя по этой схеме зависит от величины медианной трещины C_{mi} , величины и угла распространения микротрещин - C_{mikr} и δ (Рис. 1), текущего угла расположения зерна φ_i на дуге контакта, и определяется углом наклона оси β шлифовального круга радиусом R :

$$H_{tr} = \left\{ \begin{array}{l} \max \left[\left((R + C_{mi} (F_{zn})) \cos \varphi_i - R \right) \sin \beta \right] + C_{mikr} \sin (\beta + \delta), \quad (\beta + \delta) \leq 90 \\ \max \left[\left((R + C_{mi} (F_{zn})) \cos \varphi_i - R \right) \sin \beta \right], \quad (\beta + \delta) > 90 \end{array} \right\} \cdot [\text{м}] \quad (7)$$

При пластическом деформировании материала размер медианной трещины C_{mi} в i -ой точке траектории движения зерна определяется выражением (2), при хрупком разрушении – выражением (3), длина микротрещин равна $C_{mikr} = C_{li} \approx C_{mi} / 7$. Для достижения глубины трещиноватого слоя менее 50 нм в соответствии с выражением (7) угол наклона оси круга должен находиться в диапазоне от 1 до 4 градусов.

Количественно обосновано, что шероховатость обработанной поверхности в направлении продольной подачи $R_{max_{prod}}$ зависит от радиуса шлифовального круга и значения подачи – Рис. 3. На Рис. 4 приведена зависимость шероховатости обработанной поверхности в направлении поперечной подачи $R_{max_{pop}}$ от значения подачи при диаметре круга 150 мм, частоте круга $n_1 = 1000$ об/мин, глубине резания $t = 5$ мкм, диаметре вращения заготовок $D_{zag} = 0,2$ м, частоте вращения заготовок $n_2 = 0,2$ об/мин, ширине

алмазоносного слоя 50 мм и концентрации 150% для различной величины износа алмазного зерна размером 2 мкм: 1- $h_{изн}=0$ нм; 2 - $h_{изн}=50$ нм; 3 - $h_{изн}=100$ нм. Износ зерна снижает поперечную шероховатость. Теоретически обосновано, что использование выбранного шлифовального круга при продольной подаче не более 0,05 м/мин и поперечной подаче не более 0,0006 м/мин позволяет получить шероховатость обработанной поверхности Ra менее 10 нм при условии износа алмазных зерен не менее 50 нм.

Уменьшение размера алмазного зерна увеличивает количество работающих зерен в зоне шлифования и, как следствие, уменьшает толщину срезаемого слоя на единичное зерно a_z и шероховатость обработанной поверхности в направлении поперечной подачи. Использование алмазных кругов с зернистостью 3/2 мкм (узкий диапазон) по ГОСТ 9206-80 при применении схемы плоского шлифования периферией с наклоном оси круга позволяет обеспечить условия преимущественно пластичного деформирования материала и шероховатость обработанной поверхности Ra менее 10 нм.

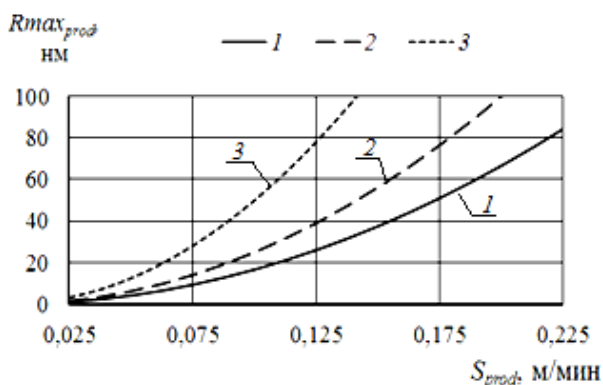


Рис. 3. Шероховатость в направлении продольной подачи в зависимости от значения подачи для различной величины радиуса шлифовального круга: 1- 0,075 м; 2- 0,05 м; 3 - 0,025 м

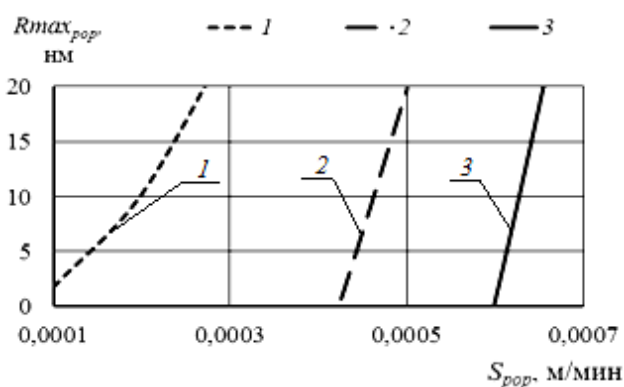


Рис. 4. Шероховатость в направлении поперечной подачи в зависимости от значения подачи для различной величины износа зерна: 1- 0 нм; 2- 50 нм; 3- 100 нм

Для возможности экспериментальной проверки интегральных сил резания были получены математические зависимости применительно к схеме плоского шлифования периферией круга. Для схематизации поверхности круга введено допущение, что работающие зерна равноудалены друг от друга на расстояние l_p . В свою очередь число режущих зерен определяется скоростью резания, средней скоростью погружения зерен в обрабатываемый материал, радиусом круга, концентрацией зерен в алмазоносном слое и параметрами алмазного зерна.

Установлено, что на толщину срезаемого слоя помимо выше приведенных факторов также влияет изменение глубины резания, поэтому необходимо обеспечить биение исполнительных поверхностей шпиндельных узлов не более 0,1 мкм, дискретность задания глубины резания до 10 нм и увеличить жесткость шпиндельных узлов. Сформулированные технические требования и ограничения режимов резания реализованы при создании

сверхточного экспериментального станда для алмазного шлифования оптических поверхностей элементов приборов.

Третья глава содержит разработанные методики экспериментальных исследований по алмазному шлифованию оптических изотропных материалов. Проверка расчетных зависимостей сил резания от режимов при плоском алмазном шлифовании периферией круга заготовок из ситалла СО115М и кварцевого стекла КУ1 осуществлялась на экспериментальном станде на базе плоскошлифовального станка ЗГ-71 с использованием алмазного круга: форма 1А1, размеры 250x10x76x5 мм, алмазные зерна марки АСМ, зернистость 14/10, концентрация 100%, связка марки В2-01.

Для исследования процесса алмазного шлифования оптических поверхностей в АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» создан сверхточный экспериментальный станд. В состав станда входят: шлифовальный шпиндель, шпиндель заготовки, продольный суппорт, поперечный суппорт, система виброизоляции, система индикации врезания, система подачи и сбора смазочно-охлаждающей жидкости. Конструктивными особенностями станда являются следующие: шпиндель изделия и шлифовальный шпиндель выполнены на базе подшипников с газовой смазкой, что обеспечивает величину радиального биения исполнительных поверхностей не более 0,5 мкм и жесткость не менее 100 Н/мкм; суппорты выполнены с пористым дросселированием для подачи газовой смазки и оснащены дополнительной системой демпфирования сверхвязкой жидкостью; система индикации станда позволяет оценить величину врезания инструмента с точностью до 0,1 мкм; система виброизолирующих опор обеспечивает собственную частоту колебаний не менее 1 Гц. Для реализации рассмотренных в диссертационной работе режимов шлифования и кинематической схемы плоского шлифования с наклоном оси круга проведена модернизация шпинделя изделия с возможностью реализации частоты вращения в диапазоне от 0,05 до 1 об/мин. Шпиндельная бабка круга разворачивается на регулировочных винтах (диапазон угла наклона оси составляет от 0 до 3 градусов).

Для проведения исследований по алмазному шлифованию ситалла и кварцевого стекла создана гамма шлифовальных кругов для чистовой обработки: круги на металлических связках формы 12А2 45°, размерами 75x21x20x6x3 мм, алмазный порошок марки АСМ зернистостью 3/2 мкм; круги на органической связке формы 12А2 45°, размерами 100x21x20x6x3 мм, алмазный порошок марки АСМ зернистостью 3/2 мкм, концентрация 100%, марка связки - Б1; круги по технологии многослойного композиционного электролитического покрытия с зернистостью алмазного порошка 3/2 мкм. Фотография зоны шлифования образца из ситалла на сверхточном экспериментальном станде с использованием схемы плоского шлифования периферией с наклоном оси круга на 1,5 градуса приведена на Рис. 5. Проверка расчетных зависимостей шероховатости обработанной поверхности и глубины трещиноватого слоя заготовок из ситалла СО115М и кварцевого стекла КУ1 проводилась на следующих режимах: частота шлифовального круга n_1 - 1000 об/мин, шпинделя заготовки n_2 - 0,2 об/мин, глубина резания t - 1...2 мкм.

Четвертая глава содержит результаты экспериментальных исследований для проверки теоретических значений сил резания, шероховатости поверхности и глубины трещиноватого слоя по алмазному

шлифованию ситалла и кварцевого стекла. Экспериментальные исследования по измерению сил резания проведены на следующих режимах: частота круга - 1000 об/мин; глубина резания - от 5 до 20 мкм; скорость подачи заготовки - от 0,2 до 0,65 м/мин. Расхождение экспериментальных и расчетных значений составляет от 5 до 25%, что можно объяснить погрешностью измерений сил резания, а также принятыми допущениями при моделировании.

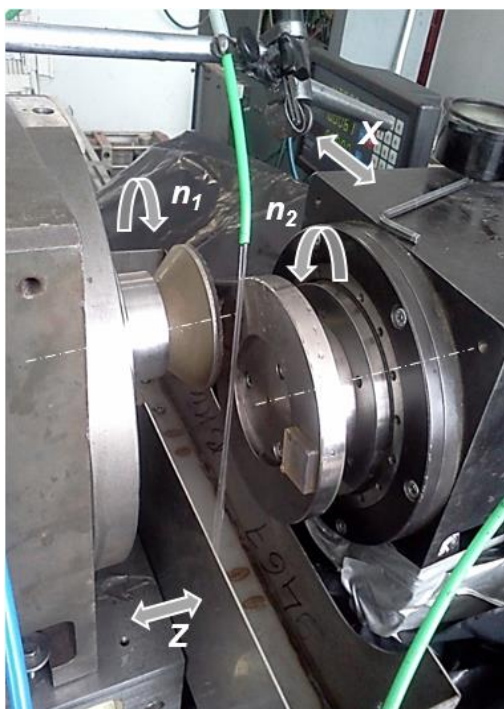
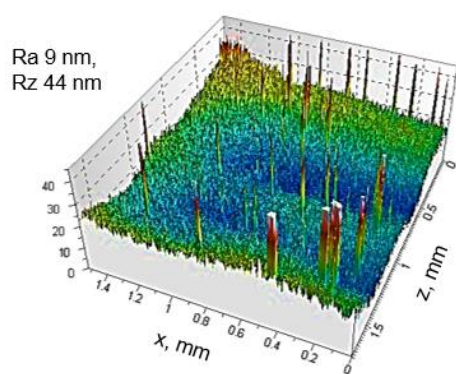


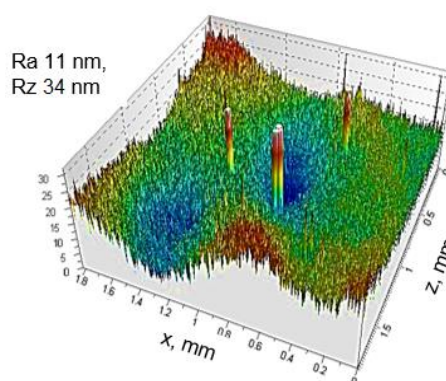
Рис. 5. Фотография зоны шлифования образца из ситалла СО115М на сверхточном экспериментальном стенде

На основании экспериментальных исследований по выбору параметров алмазных кругов предложено изготовить специальный шлифовальный круг со следующими параметрами: коническая фаска на поверхности круга под углом, равным углу наклона оси $\beta = 1,5$ градуса; ширина алмазоносного слоя - не менее 50 мм; марка алмазного порошка АСМ, зернистость 3/2 мкм, концентрация 150%; связка круга – бакелитовая марки Б1.

Проверка расчетных зависимостей шероховатости и глубины трещиноватого слоя показала следующие результаты: экспериментальные данные практически совпадают с полученными расчетными; шероховатость оптической поверхности составляет - для ситалла СО115М Ra 9 нм, Rz 44 нм; для кварцевого стекла КУ1 Ra 11 нм, Rz 34 нм (Рис. 6); глубина трещиноватого слоя составляет 20...50 нм.



а)



б)

Рис. 6. Топограммы обработанных оптических поверхностей:
а) ситалла СО-115; б) кварцевого стекла КУ1

На основании результатов исследований, выполненных на сверхточном экспериментальном стенде установлено, что для уменьшения шероховатости до значений $Ra < 10$ нм (оптический класс шероховатости) требуется использовать сверхточный станок, обеспечивающий осевое биение исполнительных поверхностей шпиндельных узлов не более 0,1 мкм и жесткость шпиндельных узлов не менее 400 Н/мкм.

В Пятой главе рассмотрено применение и разработаны технологические рекомендации по технологии алмазного шлифования для обработки оптических поверхностей элементов приборов.

Для расчета сил резания и параметров качества поверхностного слоя при алмазном шлифовании была разработана и зарегистрирована программа ЭВМ «Расчет параметров процесса наноразмерной обработки хрупких материалов алмазным шлифованием» (Свидетельство о госрегистрации №2016661911 от 25.10.2016). По результатам расчетов и проведенных исследований обоснована замена операций предварительного и химико-механического полирования в типовом техпроцессе обработки оптической поверхности подложки диэлектрического зеркала лазерного гироскопа на две операции - предварительного и окончательного плоского алмазного шлифования периферией с наклоном оси круга.

На Рис. 7 приведены графики: 1 - зависимость шероховатости поверхности в продольном направлении $R_{max_{prod}}$ и 2 - зависимость глубины трещиноватого слоя от подачи. На Рис. 8 приведены графики: 1 - зависимость шероховатости поверхности в поперечном направлении $R_{max_{pop}}$ и 2 - зависимость глубины трещиноватого слоя от подачи.

С учетом условия прочности связки круга, а также износа алмазных зерен обоснованы режимы предварительного и окончательного шлифования и рассчитаны параметры качества обработанной поверхности.

Режимы предварительного шлифования: $n_1 = 1000$ об/мин, $n_2 = 0,38$ об/мин, $t = 10$ мкм, $S_{prod} = 0,24$ м/мин, $S_{pop} = 0,0021$ м/мин, основное время обработки $T_o = 53$ мин, износ алмазных зерен $h_{izn} = 82$ нм. Качество обработанной поверхности: $R_{max_{prod}}$ - 96 нм, $R_{max_{pop}}$ - 84 нм, Ra - 24 нм, $H_{tr} \leq 0,04$ мкм. Режимы окончательного шлифования: $n_1 = 1000$ об/мин, $n_2 = 0,1$ об/мин, $t = 2$ мкм, $S_{prod} = 0,06$ м/мин, $S_{pop} = 0,00056$ м/мин, $T_o = 200$ минут. Качество обработанной поверхности: шероховатость $R_{max_{prod}}$ - 6,6 нм, $R_{max_{pop}}$ - 5,6 нм, Ra - 1,8 нм, глубина трещиноватого слоя $H_{tr} \leq 0,04$ мкм.

Разработанные режимы приведены для алмазного круга диаметром 150 мм с шириной алмазносного слоя 50 мм с размером алмазных зерен 2 мкм и концентрацией 150%. Разработан технологический процесс обработки оптических поверхностей подложек диэлектрических зеркал, который позволяет сократить время механической обработки на 58% (с 604 до 253 минут) с приведенными выше параметрами качества оптической поверхности.

Для реализации операций предложенного технологического процесса был разработан и изготовлен в АО «ВНИИИНСТРУМЕНТ» сверхточный станок модели «СФЕРА-100» со следующими характеристиками: наклон оси шлифовального круга в диапазоне от 0 до 90°; жесткость шпинделя заготовки и шлифовального шпинделя на подшипниках с газовой смазкой - 400 Н/мкм; биение поверхностей шпиндельных узлов не более 0,1 мкм; индикация подачи врезания до 0,1 мкм; частота вращения шпинделя заготовок в диапазоне от 0,01 до 0,5 об/мин. Автор диссертации участвовала в выполнении работ по контракту №555/145 от 05.08.2014 по теме «Создание станда для ультрапрецизионной финишной обработки элементов мишеней» в качестве ведущего конструктора станка.

Схема станка обеспечивает реализацию плоского шлифования периферией с наклоном оси круга – Рис. 9. Наклон реализован за счет

поворотного стола (ось В), на котором установлен фрезерно-шлифовальный шпиндель с точностью позиционирования до 0,004 угл. мин.

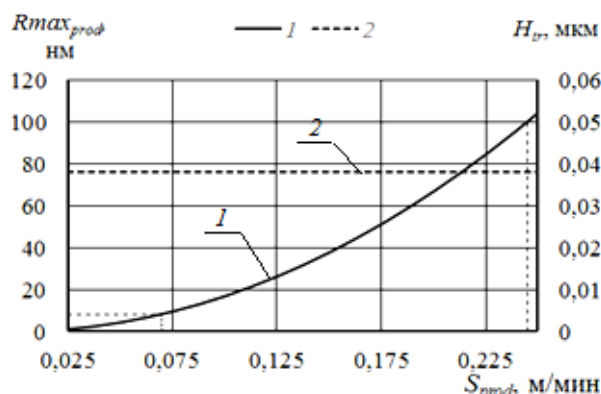


Рис. 7. Параметры качества обработанной поверхности в зависимости от продольной подачи для операций предварительного и окончательного шлифования

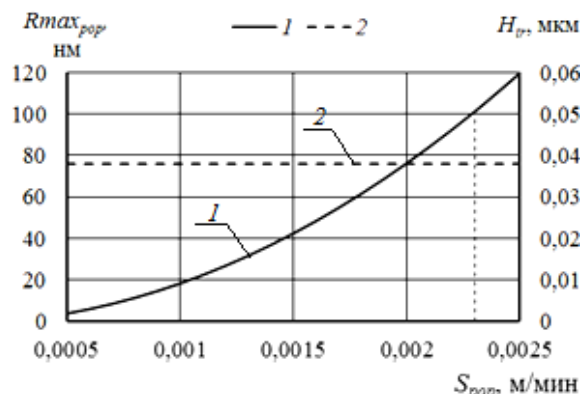


Рис. 8. Параметры качества обработанной поверхности в зависимости от поперечной подачи для операции предварительного шлифования

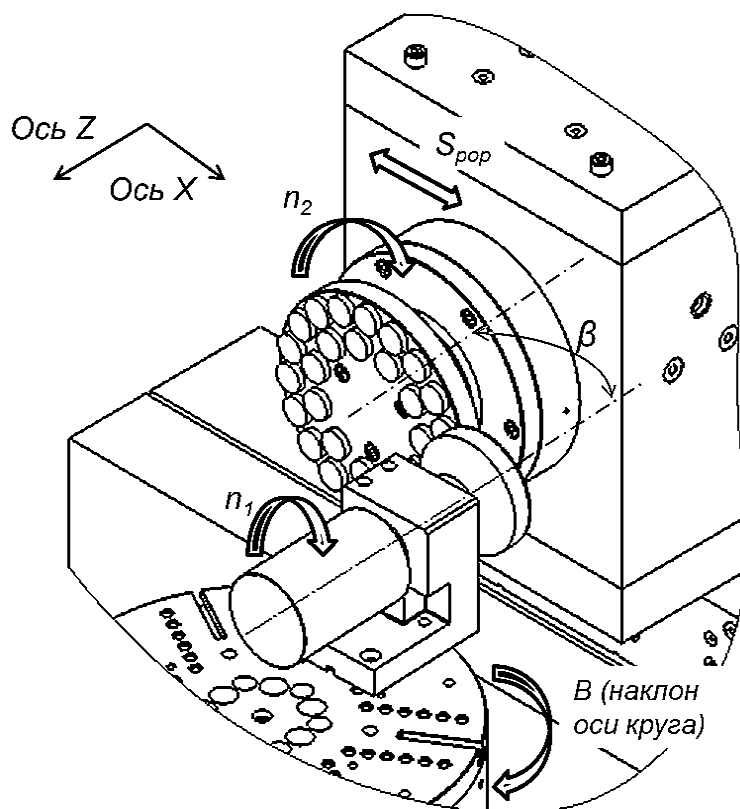


Рис. 9. Схема плоского шлифования периферией с наклоном оси круга на сверхточном станке модели «СФЕРА-100»

Подача заготовок S_{prod} обеспечивается вращением шпинделя оси С с частотой n_2 ; круг вращается с частотой n_1 ; поперечная подача заготовки S_{pop} обеспечивается перемещением по оси Х; подача на глубину резания t обеспечивается перемещением по оси Z. Станок находится на стендовых испытаниях в исследовательской лаборатории предприятия-изготовителя.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1) Обосновано, что качественные изменения процесса обработки возникают при переходе от хрупкого разрушения к пластичному деформированию материала при взаимодействии с алмазным зерном, при этом нормальная сила, действующая на режущий выступ алмазного зерна, не должна превышать для ситалла 19 мН, а для кварцевого стекла 5 мН. Экспериментально подтверждено, что пластичное деформирование материала обеспечивает минимальную шероховатость поверхности и глубину трещиноватого слоя;

2) Разработана математическая модель процесса алмазного шлифования, которая позволяет осуществить количественную связь режимных параметров и характеристик алмазного круга с силами резания и показателями качества обработанной поверхности;

3) Предложена схема шлифования периферией с наклоном оси круга, которая позволяет регулировать толщину срезаемого слоя и направление распространения трещин. Установлено, что для одновременного обеспечения пластического деформирования материала в зоне резания и минимальной глубины трещиноватого слоя, угол наклона оси круга должен находиться в диапазоне 1...4 градуса;

4) Установлено, что для получения глубины трещиноватого слоя не более 50 нм и шероховатости поверхности не более Ra 10 нм, размер алмазного зерна не должен превышать 5 мкм. Предложено применять круги с алмазоносным слоем зернистостью 3/2 мкм с наличием зерен 3-5 мкм в количестве не более 5%. При использовании алмазных кругов скорость продольной подачи заготовки не должна превышать 0,06 м/мин, скорость поперечной подачи круга не должна превышать 0,0006 м/мин;

5) Создан сверхточный экспериментальный стенд, который реализует алмазное шлифование образцов из оптических материалов с использованием рассмотренных кинематических схем и установленных по результатам моделирования параметров: сила резания менее 5 мН; частота вращения шпинделя заготовки от 0,05 об/мин; продольная подача заготовок от 0,02 до 0,2 м/мин; поперечная подача от 0,0005 м/мин; глубина шлифования от 0,5 мкм.

6) На основании полученных соотношений между свойствами связки инструмента, алмазного зерна и силами резания, действующими на единичное зерно, разработана гамма алмазных шлифовальных кругов, по результатам испытаний которых предложена конструкция специального круга на органической связке с конической фаской, зернистостью алмазоносного слоя 3/2 мкм.

7) Разработан технологический процесс обработки оптической поверхности подложки диэлектрического зеркала резонатора лазерного гироскопа из ситалла СО115М. Операции предварительного полирования, финишного и химико-механического полирования заменяются операциями предварительного и окончательного плоского шлифования периферией с наклоном оси круга, которые обеспечивают повышение производительности обработки по сравнению с типовой технологией на 58% при достижении шероховатости поверхности Ra менее 2 нм, глубины трещиноватого слоя 40÷50 нм.

8) На основании результатов математического моделирования, экспериментальных исследований, проведенных на сверхточном экспериментальном стенде, конкретизированы технические требования, разработан и изготовлен опытный экземпляр сверхточного станка для реализации технологических рекомендаций по алмазному шлифованию оптических поверхностей, который обеспечивает требуемые технические характеристики: разворот (наклон) оси шлифовального круга в диапазоне от 0 до 90° с точностью 0,004 угл. мин.; жесткость шпинделя заготовки и шлифовального шпинделя до 400 Н/мкм; биение базовых поверхностей шпиндельных узлов не более 0,1 мкм; индикацию подачи врезания до 0,1 мкм; частоту вращения шпинделя заготовок в малом диапазоне от 0,01 до 0,5 об/мин.

Основные положения диссертации отражены в 11 научных работах.

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Шавва М.А., Захаревич Е.М. Экспериментальная установка для алмазного шлифования с применением непрерывной электрохимической правки шлифовального круга // Наука и образование. Эл №ФС77-48211. 2014. №3. С. 44-58 (1,6 п.л./0,8 п.л.).
2. Шавва М.А., Грубый С.В. Анализ взаимосвязи износа круга и сил резания при алмазном шлифовании // Наука и образование. Эл №ФС77-48211. 2014. №11. С. 137-156 (2,6 п.л./1,3 п.л.).
3. Ультрапрецизионная обработка хрупких оптических материалов / М.А. Шавва [и др.] // Вестник машиностроения. 2015. №91 (2015). С. 1-7 (0,35 п.л./0,07 п.л.).
4. Механика разрушения хрупких оптических материалов / М.А. Шавва [и др.] // Фотоника. 2016. №1. С. 32-39 (0,7 п.л./0,175 п.л.).
5. Экспериментальное определение границ хрупко-пластичного перехода при резании хрупких материалов / М.А. Шавва [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 7 (676). С. 64-71 (0,8 п.л./0,2 п.л.).
6. Шавва М.А., Лапшин В.В., Грубый С.В. Сверхточная обработка хрупких оптических материалов в нанометровом диапазоне толщин срезаемого слоя // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 4 (673). С. 52-59 (0,69 п.л./0,23 п.л.).
7. Шавва М.А. Методика расчета сил резания при алмазном шлифовании хрупких оптических материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2017. № 2 (683). С. 61-69 (0,9 п.л./0,9 п.л.).
8. Шавва М.А., Грубый С.В. Расчет параметров процесса наноразмерной обработки хрупких материалов алмазным шлифованием: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; Заявл. 26.0.2016; Опубл. 25.10.2016.

в других изданиях:

1. Шавва М.А., Эйдельман Н.В. / Силы резания при шлифовании твердого сплава и оптического стекла // Сборник трудов Седьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов Будущее машиностроения России - Москва, 2014. - С. 12-13. (0,11 п.л./0,06 п.л.).
2. Горохов В.С., Захаревич Е.М., Шавва М.А. Квазипластичное резание // Фотоника. 2015. №1. С. 36-43. (0,8 п.л./0,27 п.л.).
3. Shavva M.A., Lapshin V.V., Grubiy S.V. Processing of brittle materials in the nanometer range of thickness of layers cut // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2015. №91. P. 1-7. (0,8 п.л./0,27 п.л.).