

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
имени В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

УДК 531.43/46

БЛИЗНЕЦ
Дмитрий Александрович

**ФРИКЦИОННЫЙ НАГРЕВ И ИЗНАШИВАНИЕ
ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ
ОПТИЧЕСКИХ И ЮВЕЛИРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах

Гомель, 2018

Научная работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет транспорта».

Научный руководитель: **Богданович Павел Николаевич**,
доктор технических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Материаловедение и технология материалов»
Учреждения образования «Белорусский
государственный университет транспорта»

Официальные оппоненты: **Холодилов Олег Викторович**,
доктор технических наук,
профессор кафедры «Вагоны»
Учреждения образования «Белорусский
государственный университет транспорта»

Купреев Алексей Васильевич,
кандидат технических наук,
директор Республиканского унитарного
предприятия «Специальное конструкторско-
технологическое бюро «Металлополимер»

**Оппонирующая
организация:** Государственное научное учреждение
«Физико-технический институт
Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «18» октября 2018 г. в 14:00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а, эл. почта: mpri@mail.ru; тел.: (0232) 34-06-58, факс: (0232) 34-17-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» по адресу: г. Гомель, ул. Кирова, 32а.

Автореферат разослан «05» сентября 2018 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



Н.С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее применение получают элементы оптических систем различного назначения. Оптимизация режимов их механической обработки обеспечивает снижение производственного брака, необоснованных финансовых потерь и оказывает существенное влияние на развитие лазерной и тепловизионной техники, оптиконасыщенных систем исследовательского назначения и машиностроения, устройств высокоточного наведения. Для этих целей используются различные стекла, лейкосапфир и алмаз. Особое значение приобретает качество обработки поверхностей лейкосапфира и алмаза при изготовлении подложек интегральных микросхем в микроэлектронике и получении драгоценных кристаллов, определяющих стоимость ювелирных изделий.

Качество готового изделия во многом зависит от режимов абразивной обработки заготовок. Превышение их критических значений приводит к появлению трещин и увеличению толщины дефектного слоя, который впоследствии необходимо удалять. Так, при обработке алмазов, потери сырья при распиливании могут достигать 7 %, а при огранке – 30 % от массы исходной заготовки. По предварительным оценкам увеличение на 1 мкм толщины дефектного слоя на распиливаемых поверхностях алмаза может приводить к потерям сырья до \$ 250 тысяч за год при годовом объеме обработки ОАО «Гомельское ПО «Кристалл».

Повышение производительности процессов абразивной обработки приводит к необходимости увеличения скорости вращения диска и усилия его прижима к обрабатываемой детали. В результате в микрообъемах материала возрастает интенсивность тепловыделения, что инициирует термомеханические и термохимические процессы разрушения обрабатываемых поверхностей, приводящие к снижению качества продукции. Из изложенного следует необходимость детального изучения закономерностей протекания тепловых процессов и изнашивания оптических и ювелирных материалов при их абразивной обработке.

Эта задача особенно актуальна для случая абразивной обработки оптических поверхностей без применения охлаждающих сред, поскольку в оптической и ювелирной промышленности существует ряд технологических операций, при которых применение СОЖ неэффективно или невозможно.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология материалов» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта». Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 22 апреля 2015 г. № 166 «Промышленные и строительные технологии и производство: оптоэлектроника и оптические системы». Диссертационная работа подготовлена по результатам исследований, проведенных при

выполнении следующих государственных тем и программ: научно-исследовательский проект БРФФИ «Изучение тепловых и термомеханических процессов при размерной и абразивной обработке сверхтвердых материалов» 2005–2007 гг., договор № 3800, регистрационный №20051964; аспирантский грант Министерства образования Республики Беларусь на 2010 год «Исследование процессов разрушения при импульсном тепловом воздействии», договор № 6359.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является установление закономерностей фрикционного взаимодействия при абразивной обработке оптических и ювелирных материалов с учетом тепловой нагруженности скользящего контакта для осуществления контроля и управление качеством изнашиваемых поверхностей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучить температурные поля в оптических и ювелирных материалах при трении по закрепленному абразиву и установить связь тепловых процессов с изнашиванием этих материалов.

2. Выявить механизмы и кинетику разрушения поверхностных слоев при абразивном изнашивании силикатного стекла, лейкосапфира, природного и синтетического алмазов с учетом термомеханических явлений на скользящем контакте и разработать алгоритм управления технологическими режимами обработки заготовок.

3. Выявить закономерности влияния режимов нагружения на глубину распространения усталостных трещин и интенсивность изнашивания исследуемых материалов при воздействии импульсно протекающего тепловыделения на пятнах фрикционного контакта.

4. Разработать модель контактного взаимодействия алмаза с распиловочным диском и определить режимы нагружения, при которых обеспечивается минимальное трение диска по боковой поверхности распила и толщина дефектного слоя.

5. Разработать рекомендации для абразивной обработки оптических и ювелирных материалов на основании установленных закономерностей изнашивания. Провести опытно-производственную проверку рекомендаций и режимов обработки.

Научная новизна. Впервые экспериментально показано, что при абразивном изнашивании и распиливании оптических материалов максимум температуры фрикционного нагрева смещается от зоны контакта на 0,8–1,3 мм в направлении вектора скорости. Такое распределение температуры при скорости более 40 м/с обеспечивает проявление эффекта терморастрекивания материала за пределами контактной площадки.

Установлено, что повышение нагрузки на диск на 5–10 % сопровождается увеличением температуры в зоне распиливания алмаза более чем в 2 раза (превышает 360 °С) и приводит к отделению крупных частиц алмаза.

Изучена кинетика фрикционной усталости оптических материалов при трении по закрепленному абразиву и гладкому контртелу. Показано, что независимо от шероховатости поверхности трения контртела глубина рас-

пространения поверхностных микротрещин скачкообразно изменяется от 0,1 до 5,5 мкм на различных участках ее длины. Причем, между средней глубиной распространения микротрещин и интенсивностью изнашивания оптических материалов существует корреляция. Экспериментально показано, что при фрикционном нагружении силикатного стекла и лейкосапфира наблюдается одновременное протекание хрупкого скалывания, малоцикло-вой усталости, термомеханического разрушения, вклад каждого из которых в изнашивание зависит от нагрузки и скорости скольжения. Область усталостного разрушения представляет собой чередующиеся продольные полосы с резко отличающимся микрорельефом, которые с течением времени перемещаются перпендикулярно направлению скольжения вдоль оси вращения диска.

Показано, что для различных типов распиливаемых материалов достижение предельных значений мощности трения приводит к возникновению на боковых поверхностях распила усталостных трещин, формирующих дефектный слой.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния температуры и термических напряжений в зоне трения на механизм абразивного изнашивания оптических и ювелирных материалов, включающий локальное кратковременное оплавление, скалывание крупных частиц и терморастрескивание материалов.

2. Явление смещения максимума температуры фрикционного нагрева изнашиваемого материала в область, расположенную впереди контактной площадки, и локализации терморастрескивания в этой области.

3. Механизм изнашивания силикатного стекла при фрикционном взаимодействии с абразивным контртелом, заключающийся в одновременном развитии и слиянии подповерхностных и поверхностных трещин, частичном отделении, изгибе и диспергировании отделяемого слоя. Экспериментально установленное явление циклически повторяющегося перемещения продольной полосы разрушения поверхности трения в направлении оси вращения диска.

4. Экспериментально установленная связь средней глубины распространения усталостных трещин с интенсивностью изнашивания силикатного стекла по закрепленному абразиву и гладкому контртелу при высокоскоростном фрикционном контакте. Формирование пилообразного профиля дна единичной усталостной трещины, характеризующегося скачкообразным изменением глубины ее распространения в диапазоне от 0,1 до 5,5 мкм.

5. Экспериментальные данные, свидетельствующие о реализации при определенных условиях нагружения усталостного и адгезионного видов изнашивания поверхностей распила оптических и ювелирных материалов, приводящих к формированию дефектного слоя заготовки.

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, планировании и реализации испытаний [1–4, 6, 7, 10–15, 17, 18], выявлении особенностей фрикционного нагрева исследуемых материалов в процессе распиливания [2, 4, 11, 17], разра-

ботке модели фрикционного нагружения материалов при распиливании [8, 9], установлении механизмов изнашивания силикатного стекла, лейкосапфира и алмаза [1–3, 6, 7, 10, 12–15, 18], исследовании изношенных поверхностей испытываемых материалов и разработке мер по реализации контролируемого фрикционного изнашивания [3, 6, 7, 10, 13, 15], обобщении полученных экспериментальных данных и подготовке материалов к публикации.

Апробация результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на заседаниях кафедры «Материаловедение и технология материалов» Учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта» (2007–2018 гг.), на международных научно-технических конференциях «Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2007, Поликомтриб-2011)» (ИММС НАН Беларуси, Гомель, 2007, 2011), на международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (БРУ, Могилев, 2010), на II международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (БНТУ, Минск, 2010), на II международной научно-технической конференции «Молодежь и XXI век» (КГТУ, Курск, 2010), на VI международном симпозиуме по трибофатике (БГУ, Минск, 2010), на VI International Symposium on Mechanics of Materials and Structures (Августов, Польша, 2011).

Опубликование результатов диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в 18 научных работах (5,91 а. л.), в том числе 9 статей (3,94 а. л.) в научных журналах, соответствующих п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 3 из которых статьи в зарубежных научных журналах, 7 статей в сборниках материалов конференций, 2 тезиса докладов на научных конференциях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертация изложена на 156 стр., включая 72 иллюстрации на 35 стр., 3 таблицы на 2 стр., список использованных источников из 144 наименований на 11 стр., список опубликованных работ автора из 18 наименований на 3 стр. и 4 приложений на 5 стр.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дается краткое обоснование актуальности исследования, формулируются цель и основные задачи работы, ее научная новизна и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** представлен литературный обзор, в котором рассмотрено современное состояние вопроса о тепловых процессах и механизмах разрушения, протекающих в поверхностном слое при трении твердых тел.

Приводится анализ работ Боудена, Егера, Блока, Кюльман–Вильсдорф, Коровчинского, Щедрова, Богдановича, Евтушенко и других исследователей по изучению температурных процессов, протекающих на пятнах фрикцион-

ного контакта твердых тел. Приведены закономерности протекания тепловых процессов в зоне трения, распределения температуры по пятну контакта, влияния физических свойств сопрягаемых тел и режимов нагружения на характеристики «горячих» пятен. Систематизированы сведения о влиянии температурных процессов в тяжело нагруженных фрикционных узлах на их триботехнические характеристики. Рассмотрена связь явления термоупругой неустойчивости (ТУН) фрикционного контакта с тепловыми процессами, протекающими на микровыступах изнашиваемого материала. Закономерности возникновения ТУН изучены Барбером, Бартоном, Янгом, Дэвисом, Дэкузи.

Обсуждены процессы зарождения и развития усталостных трещин, а также формирования изношенных поверхностей при трении металлов и полимерных материалов. Описаны особенности изнашивания неорганических материалов за счет хрупкого скалывания при фрикционном взаимодействии с абразивной поверхностью. Сделан вывод о том, что в литературе практически отсутствуют сведения о закономерностях протекания усталостных процессов в этих материалах при изнашивании.

На основании критического анализа известных результатов сформулированы цель и задачи настоящего исследования.

В **главе 2** изложена методика экспериментальных исследований.

В качестве материала движущегося элемента пары трения были выбраны сталь и алюминий с внедренными частицами карбида кремния, а также алмазоабразивный бронзовый диск. В таком сочетании контртела наиболее распространены на практике. В качестве неподвижного элемента фрикционной пары были выбраны лейкосапфир, силикатное стекло, алмаз (природный и синтетический). Торговое наименование синтетического алмаза – сверхтвердый материал «Алмазот» (СТМ «Алмазот»).

Исследования температурных полей при распиливании силикатного стекла и лейкосапфира осуществлялись на высокоскоростной машине трения с применением тепловизионной сканирующей системы IR Snap Shot модели 525 и микротепловизора TVC300 ML. Кинетика тепловых процессов при распиливании кристаллов алмаза изучалась тепловизионным комплексом IRTIS200 на многошпиндельной секции станка ШП-2 на РАУП «Гомельское ПО «Кристалл» и ООО «Сапфир-Диамант» по стандартной технологии обработки. Кинетика абразивного изнашивания исследуемых материалов изучалась на установке, состоящей из высокоскоростной машины трения и системы видеофиксации, реализующей метод оптико-электронного сканирования.

Испытания проводились по следующим схемам контакта: диск–торец пластинки – при распиливании лейкосапфира, диск–кристалл – при распиливании кристаллов алмаза, цилиндрическая поверхность диска–плоскость – в экспериментах по изнашиванию силикатного стекла и лейкосапфира. При этом скорость скольжения (v) изменялась в диапазоне 10–60 м/с, а номинальная нагрузка (N) составляла 0,4–1,8 Н. Распиливание алмаза осуществлялось при режимах нагружения, установленных нормативными документа-

ми. Распиловочный диск диаметром 76 мм и толщиной 0,05–0,07 мм изготавливался из бронзы БрОФ 6,5-0,15. Цилиндрическая поверхность диска шаржировалась алмазным порошком АСН 20/14 (зернистость 14–20 мкм).

Реализовано компьютерное моделирование в среде ANSYS процесса распиливания материалов, при котором проверены режимы нагружения на предмет устойчивости диска и реализации его взаимодействия с боковой поверхностью распила.

Исследование рельефа изношенных поверхностей, определение глубины распространения микротрещин, установление особенностей фрагментации поверхностного слоя материала при истирании проводилось при помощи микроскопа МИМ-8, конфокального лазерного сканирующего микроскопа Olympus LEXT OLS 3000 и растрового электронного микроскопа VEGA II LSH.

Экспериментальные данные обрабатывались методами математической статистики с использованием стандартных компьютерных программ.

В **главе 3** приведены закономерности протекания тепловых процессов в зоне фрикционного контакта распиловочного диска с образцом из силикатного стекла, лейкосапфира, алмаза (природного и синтетического), поскольку они определяют механизмы и особенности разрушения поверхностей трения. Критические режимы нагружения могут приводить к неконтролируемому росту температуры, деградации материала, снижению качества обработанных поверхностей и увеличению потерь сырья.

Установлено, что в процессе распиливания силикатного стекла максимальная поверхностная температура ($T_{\text{пов}}$) с повышением v возрастает до 62–64 °С с последующей стабилизацией в области высоких скоростей. Такая зависимость $T_{\text{пов}}(v)$ обусловлена увеличением количества взаимодействующих абразивных зерен с поверхностью заготовки в единицу времени, что сопровождается увеличением числа локальных источников тепла и, соответственно, интенсивности тепловыделения. Уменьшение времени нахождения абразивных частиц вне зоны трения также способствует увеличению тепловой нагруженности контакта, поскольку абразивные зерна вступают в контакт более нагретыми. Стабилизации кривых $T_{\text{пов}}(v)$ при $v > 14$ м/с способствует увеличение объема воздуха, который захватывается абразивной поверхностью распиловочного диска и выполняет функцию теплоотводящего слоя.

Зависимости $T_{\text{пов}}(N)$ при распиливании силикатного стекла имеют вид монотонно возрастающих кривых во всем диапазоне исследуемых скоростей и обусловлены ростом числа вступающих во взаимодействие абразивных частиц. Снижение интенсивности роста температуры при $N > 0,6$ Н в зоне контакта объясняется двумя факторами: механическим удалением слабо закрепленных абразивных частиц из зоны резания и увеличением теплопроводности силикатного стекла с ростом объемной температуры. В последнем случае интенсифицируется отвод теплоты в объем материала и снижается аккумуляция ее в поверхностных слоях.

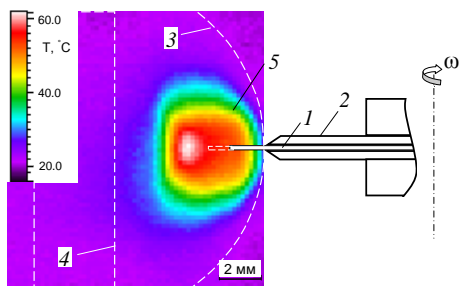
Поскольку в оптическом производстве обрабатываются изделия раз-

личной толщины, были проведены сравнительные исследования интенсивности тепловыделения и особенности разрушения образцов силикатного стекла толщиной $d = 1$ мм и $d = 2$ мм. Показано, что увеличение толщины распиливаемого образца приводит не к повышению температуры, как это ожидалось, а к снижению $T_{\text{пов}}$ до $55\text{--}57$ °С. Объясняется это тем, что с ростом d увеличивается теплоотвод из зоны контакта в объем возросшей массы силикатного стекла, несмотря на увеличение времени взаимодействия. Повышение N от 0,22 Н до 0,87 Н и v от 7,2 м/с до 14,3 м/с приводит к росту максимальной поверхностной температуры в 1,5–1,7 раз, что обусловлено увеличением количества частиц, вступающих в контакт и времени их взаимодействия с распиливаемым образцом. В общем случае форма кинетических кривых $T_{\text{пов}}(t)$ при распиливании разнотолщинных образцов при различных N и v имеет монотонно возрастающий вид.

Впервые установлено, что максимальная поверхностная температура достигается не в зоне контакта лейкосапфира с абразивом, а смещается от передней границы контактной области в направлении распиливания на расстояние 0,8–1,3 мм (рисунок 1, максимум $T_{\text{пов}}$ соответствует белой изотерме). Такая закономерность обусловлена смещением теплового потока вперед от зоны контакта, которая постоянно охлаждается за счет отвода теплоты в распиловочный диск, обладающий высокой теплопроводностью, а также воздухом, который захватывается абразивным слоем вращающегося диска. Вероятно, одной из причин расположения максимальной $T_{\text{пов}}$ вне зоны трения является смещение точки максимальных напряжений вглубь распиливаемого материала.

Интенсивное тепловыделение в процессе распиливания алмаза может отрицательным образом сказаться на качестве бриллиантов, быть причиной изменения цвета, появления очагов графитизации и терморастрескивания. Поэтому были изучены закономерности тепловыделения в контакте алмаза и распиловочного диска. Показано, что в отличие от лейкосапфира интенсивность изнашивания и скорость распиливания алмаза на порядок ниже, а тепловыделение значительно выше. На указанные параметры существенно влияют механические свойства, внутренние дефекты и напряженно-деформированное состояние (НДС) кристалла.

Типичная кинетическая температурная кривая для алмаза представлена на рисунке 2 (кривая 1). Закономерность тепловыделения в контакте алмаз-абразив во многом определяется неравномерностью площади сечения кри-

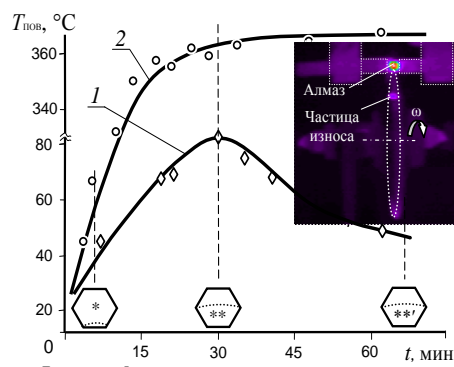


1 – распиловочный диск; 2 – прижимные фланцы; 3 – контур лейкосапфирового образца; 4 – контур зажимного приспособления; 5 – изотермы

Рисунок 1. – Тепловизионное ИК-изображение и схема распиливания пластинки лейкосапфира

сталла вдоль линии распиливания. Повышение температуры обусловлено увеличением дуги контакта распиловочного диска с кристаллом (*). При этом увеличивается число абразивных частиц, находящихся в контакте с заготовкой, и время их взаимодействия, что способствует интенсификации тепловыделения. До середины кристалла ухудшается теплопередача в окружающую среду за счет возрастающего объема заготовки. Максимум температуры совпадает с моментом пропиливания середины кристалла (**).

Форма кривой 2 (рисунок 2) отличается от предыдущего случая и соответствует распиливанию кристалла в НДС, для которого регистрировались



Фотография – термограмма распиливания

Рисунок 2. – Кинетические кривые температуры (1, 2) при распиливании природного алмаза

поверхностная температура свыше 360 °C (**'). При этом на пятнах фактического контакта следует ожидать температуру значительно выше (600–1000 °C), что может приводить к графитизации алмаза на локальных участках контакта, изменению цвета и неконтролируемому терморастрескиванию.

Косвенным подтверждением достижения высокой контактной температуры и терморастрескивания алмаза могут служить термограммы распиливания напряженно-деформированного кристалла при больших нагрузках

(рисунок 2, фотография). На кромке абразивного диска отмечено наличие горячего участка ($T_{пов} > 90\text{ °C}$) после выхода из зоны контакта. Этот участок, по-видимому, является крупной частицей износа алмаза, отделившейся в результате развития усталостных трещин на поверхностях кристалла. Кроме того, зафиксировано появление следов плавления и пластического деформирования материала распиловочного диска.

Проведение экспериментов на кристаллах алмаза связано с рядом трудностей, обусловленных дороговизной сырья и его стратегическим учетом. Поэтому часть исследований в лабораторных условиях выполнялась на синтетическом алмазном материале (алмазот). Оказалось, что закономерности тепловыделения при распиливании алмаза и алмазота во многом подобны. Увеличение на 60 % $T_{пов}$ при распиливании синтетического алмаза по сравнению с температурой натурального кристалла обусловлена напряженной структурой формирующейся при выращивании образца в искусственных условиях.

Таким образом, в зоне фрикционного контакта абразивного инструмента с лейкосапфиром, силикатным стеклом, алмазом (алмазотом) и прилегающих к ней областях формируются температурные поля, способные приводить к интенсификации усталостных процессов в распиливаемых издели-

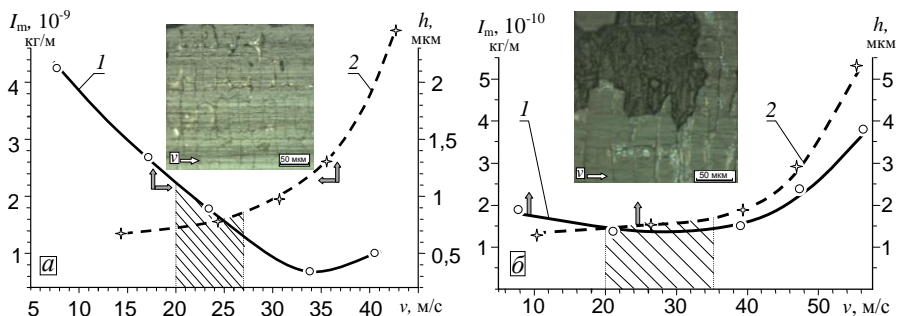
ях и образованию дефектного слоя. Следовательно, необходимость повышения качества обрабатываемых поверхностей и снижения трудозатрат на каждой операции получения оптических и ювелирных изделий требует изучения особенностей их изнашивания.

В главе 4 описываются кинетика и закономерности изнашивания исследуемых материалов при их поверхностной абразивной обработке и распиливании.

Установлено, что при трении по абразиву силикатное стекло изнашивается по нескольким одновременно протекающим механизмам. Однако преимущественный вклад каждого из них зависит от энергетической нагруженности контакта (Nv). Так, в интервале значений Nv от 4,5 Н·м/с до 21,5 Н·м/с силикатное стекло изнашивается по преимущественно абразивному механизму (хрупкое разрушение). Об этом свидетельствует наличие на обработанной поверхности ориентированных вдоль вектора скорости борозд со следами хрупкого разрушения по краям. При $Nv > 21,5$ Н·м/с силикатное стекло подвергается преимущественно усталостному разрушению, сопровождающемуся зарождением микротрещин за счет циклически повторяющегося воздействия термомеханических напряжений на локальных пятна контакта. При более высокой мощности трения на отдельных пятнах контакта наблюдается кратковременное локальное плавление обрабатываемого материала, которое на видеозаписи регистрируется в виде перемещения жидкой фазы стекла вдоль границы контактной площадки.

Поскольку обрабатываемый материал изнашивается не только абразивными частицами, но и матрицей, на которой они закреплены, были выполнены исследования процессов изнашивания лейкосапфира и силикатного стекла как диском с закрепленным абразивом, так и гладким контроллом.

Установлено, что зависимость интенсивности изнашивания силикатного стекла от скорости скольжения диска графически изображается кривой с минимумом в области скоростей 30–35 м/с при истирании диском с абразивными частицами и гладким диском (рисунок 3). Полученные зависимости объясняются изменением глубины внедрения микровыступов в материал стекла, интенсивности тепловыделения при трении и скорости воздушных потоков, захватываемых диском и охлаждающих зону трения.



Фотографии – изношенные поверхности стекла
 Рисунок 3. – Зависимости интенсивности изнашивания силикатного стекла (I) и глубины распространения усталостных трещин (h) от скорости скольжения при: a – абразивной; b – безабразивной обработке

Очевидна возможность выбора v , при которой наблюдается минимальная глубина распространения усталостных трещин и высокая интенсивность изнашивания материала (рисунок 3, *a* и *б*).

Впервые на основании анализа изношенных поверхностей (рисунок 3, фотографии) показана общность механизмов изнашивания гладким контртелом и закрепленными абразивными частицами в тяжелонагруженном высокоскоростном фрикционном контакте ($Nv > 21,5$ Н·м/с). Так, для обоих процессов характерно формирование абразивных полос скольжения и усталостных микротрещин, а износ является результатом послойного удаления силикатного стекла (рисунок 4). Разрушение поверхностного слоя происходит вследствие

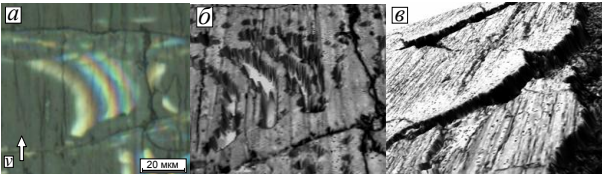


Рисунок 4. – Подповерхностные трещины (*a*, *б*) и отслаивание изношенной поверхности стекла (*в*)

слияния поверхностных и подповерхностных трещин с последующим отделением частиц в виде тонких пластинок. Наличие трещин, расположенных под

изношенной поверхностью (рисунок 4, *a* и *б*), подтверждено с помощью лазерного конфокального микроскопа. При $v > 30$ м/с образуются подповерхностные трещины, которые на изношенных поверхностях проявляются в виде интерференционных полос. Явление интерференции реализуется на световом клине, который появляется при изгибе слоя материала, ограниченного усталостными трещинами (рисунок 4, *в*).

Изучена кинетика изнашивания оптических материалов. Показано, что в начальный период на поверхности трения формируются бороздки абразивного изнашивания, в которых локализуется усталостное разрушение, приводящее к отслаиванию материала и образованию чередующихся параллельных вектору скорости полос скольжения и полос с бугристой поверхностью. Впоследствии эти полосы смещаются вдоль оси вращения диска, а микрорельеф бугристых полос выглаживается. Процесс образования и выглаживания бугристой поверхности периодически повторяется.

Экспериментально установлено, что разрушение силикатного стекла при изнашивании происходит не только в зоне трения, но и за ее пределами (рисунок 5). Причина в том, что при $Nv > 20$ Н·м/с максимум температуры смещается в область, расположенную впереди контактной площадки. Зоны разрушения впереди контактной площадки обнаружены при изнашивании как гладким контртелом, так и закрепленным абразивом.

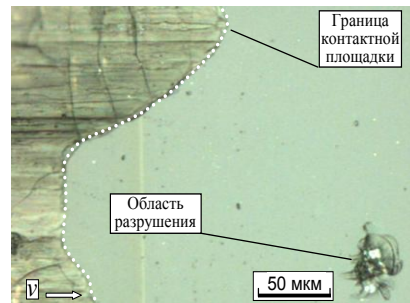


Рисунок 5. – Термически инициированное разрушение поверхности силикатного стекла вне зоны контакта при трении по закрепленному абразиву ($N = 1,73$ Н, $v = 39,1$ м/с)

При абразивном изнашивании возможно появление трещин усталости, глубина распространения (h) которых определяет толщину подлежащего удалению дефектного слоя. Поэтому были выполнены исследования влияния режимов нагружения на характер усталостного разрушения твердых тел.

Впервые показана неравномерность распространения усталостной трещины в глубину от поверхности трения (рисунок 6). Пилообразный профиль дна усталостной трещины вдоль ее длины (l) обусловлен ростом и слиянием субмикротрещин в одну магистральную, а также неоднородностью структуры материала и локализацией дефектов в отдельных микрообъемах. Неравномерность распространения трещин в глубину усиливается с ростом скорости скольжения. Такой характер распространения трещины по глубине наблюдается при изнашивании, как закрепленным абразивом, так и полированным диском.

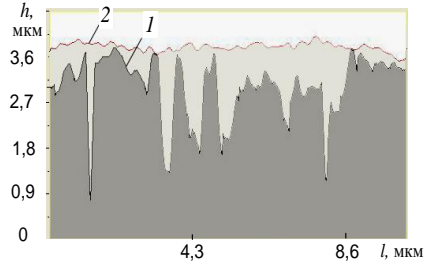


Рисунок 6. – Профиль дна усталостной трещины (1) относительно изношенной поверхности (2) силикатного стекла при изнашивании закрепленным абразивом ($N = 1,73 \text{ Н}$, $v = 55 \text{ м/с}$)

На основании анализа приведенных закономерностей изнашивания были определены режимы, при которых происходит наиболее интенсивный съем обрабатываемого материала и достигается минимальная глубина распространения усталостных трещин. Их реализация позволяет повысить производительность процесса обработки, снизить время обработки изделия после распиливания и потери сырья.

Анализ модели контактного взаимодействия алмаза с распиловочным диском и результатов изучения изнашивания силикатного стекла и лейкосапфира явился основанием для предположения о том, что при распиливании исследуемых материалов возможно появление усталостных трещин на поверхностях распила заготовки. Изучение поверхностей распила силикатного стекла показало, что не только поверхность трения, но и боковые поверхности распила содержат следы как абразивного изнашивания, так и более опасного усталостного разрушения (рисунок 7).

Выявлена немонотонная зависимость толщины усталостно разрушаемого слоя (H) силикатного стекла от нагрузки (рисунок 7).

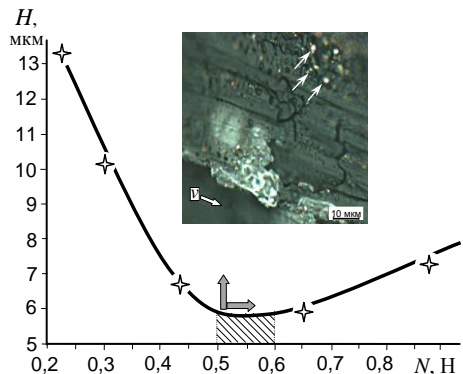


Рисунок 7. – Зависимость средней толщины разрушаемого слоя от нагрузки при распиливании силикатного стекла

В данном случае H является усредненной величиной разницы высот (глубин) между поверхностью и выкрошенными участками. Минимальное значение H наблюдается при резании с нагрузкой 0,5–0,6 Н. При меньших нагрузках глубина дефектного слоя более значительная, поскольку велико радиальное биение диска. Повышение нагрузки более 0,6 Н вызывает волнообразный изгиб диска, многократное трение его боковых поверхностей о пропиленный материал, что приводит к интенсификации тепловыделения и, как следствие, к термомеханическому разрушению материала. Свидетельством взаимодействия боковых поверхностей распиловочного диска с пропиленной поверхностью исследуемых материалов служат следы адгезионного переноса меди (рисунок 7, см. в направлении стрелок) с поверхности диска на поверхность распила образца, наблюдаемые при $N > 0,6$ Н.

Усталостное разрушение боковых поверхностей распила наблюдалось в том числе при распиливании лейкосапфира и алмаза (алмазота). На поверхности

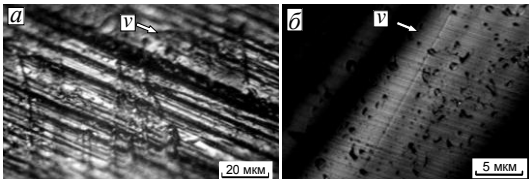


Рисунок 8. – Боковые поверхности распила лейкосапфира (а) и алмазота (б)

сти распила лейкосапфира термоусталостные трещины имеют место при $N = 0,87$ Н и $v = 12$ м/с (рисунок 8, а). Однако лейкосапфир содержит микротрещины, ориентированные не перпендикулярно вектору скорости, а под углом от 0° до 90° (рисунок 8, а). Поскольку лейкосапфир имеет кристаллическое строение, распространение усталостных трещин происходит по границам кристаллов. Подобные дефекты на поверхности распила алмазота обнаружены при стандартных промышленных режимах обработки (рисунок 8, б). Это приводит к необходимости удалять на последующих этапах механической обработки более толстый слой материала, толщина которого определяется глубиной распространения микротрещин. Отличительная особенность алмаза в том, что длина микротрещин на его поверхности на порядок меньше, чем на поверхности силикатного стекла и лейкосапфира.

Установлено, что зависимости интенсивности изнашивания лейкосапфира от скорости представляют собой кривые с минимумом (рисунок 9). Немонотонная зависимость $I_m(v)$ обусловлена конкурирующим влиянием следующих факторов. Увеличение скорости вызывает рост числа актов взаимодействия абразивных частиц с по-

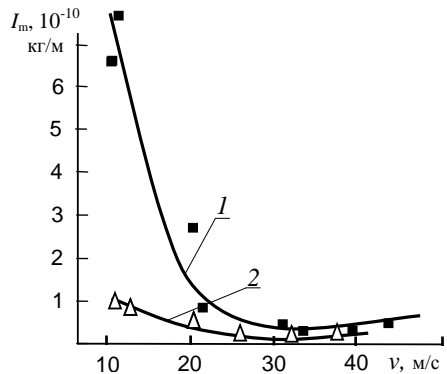


Рисунок 9. – Влияние скорости вращения диска на интенсивность изнашивания лейкосапфира при трении в продольном (1) и поперечном (2) направлениях

верхностью образца в единицу времени и снижение времени холостого пробега абразивных частиц, которые в последующий контакт вступают уже нагретыми. Сочетание этих факторов способствует повышению температуры в контакте и должно вызывать более интенсивное изнашивание. Конкурирующим фактором является проявление газодинамического смазывающего эффекта слоя воздуха и уменьшение глубины внедрения абразива при увеличении скорости вращения диска. Судя по кривым изнашивания, второй фактор преобладает при высоких скоростях.

Существование анизотропии механических свойств при изнашивании лейкосапфира подтверждается сильно различающимися значениями I_m при трении в различных направлениях.

Глава 5 посвящена практической реализации результатов диссертационного исследования. Проведены опытно-практические работы на предприятии ОАО «Рогаческий завод «Диaproектор». Установлено, что внедрение в технологический процесс рекомендованных режимов нагружения при шлифовании оптических деталей позволило сократить время на шлифование на 6–9 %. При этом повысился выход годных изделий на 5–7 % и уменьшилась толщина разрушаемого при распиливании и подлежащего удалению слоя.

На ЗАО «БелГРАН» в рамках проводимой работы по совершенствованию технологических режимов в операциях абразивной обработки кристаллов алмазов реализованы оптимальные режимы нагружения, полученные в диссертационной работе. Достигнуто снижение глубины нормально ориентированных к плоскости резания трещин и уменьшение глубины дефектного слоя при нагрузке в области резания $N = 0,6–0,7$ Н и скорости скольжения $v = 8–12$ м/с. Потери дорогостоящего сырья при этом сократились на 2–3 % по отношению к исходной массе.

Использование предложенных совершенств на ООО «Сапфир-Диамант» позволяет снижать потерю сырья из драгоценных и полудрагоценных камней при распиливании и обдирке до 4 %.

Для повышения скорости обработки заготовок предложено увеличить диаметр распиловочного диска, что позволило уменьшить тепловую нагруженность в зоне распиливания. Для снижения трения боковой поверхности распиловочного диска о пропиленную поверхность заготовки в результате изгиба диска рекомендуется наносить антифрикционное покрытие (например, фторопласт вакуумным способом) на его плоскую поверхность. Это позволило снизить интенсивность разрушения поверхности и толщину слоя, подлежащего удалению на следующих этапах обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Установлены закономерности распространения температурных полей в зоне фрикционного взаимодействия распиловочного диска с лейкосапфиром. Показано, что максимум температуры располагается не в зоне фрикционного контакта абразивного диска с заготовкой, а на некотором расстоянии впереди нее. Эффект смещения максимума фрикционной температуры обусловлен отводом теплоты из зоны трения в инструментальный материал и непрерывным охлаждением ее потоками воздуха, захватываемого диском. Увеличение нагрузки, частоты вращения абразивного диска и времени его взаимодействия с лейкосапфиром приводит к возрастанию максимальной температуры в контакте при практически неизменной форме термограмм [1, 2, 5, 11, 17].

2. Показано, что максимальная температура фрикционного нагрева алмаза при взаимодействии с распиловочным диском в 2–10 раз выше, в сравнении с лейкосапфиром, что обусловлено более высокой (\approx в 5 раз) твердостью алмаза. Незначительное повышение нагрузки (10 %) увеличивает температуру в зоне фрикционного контакта более чем в 2 раза. При абразивной обработке алмаза (вдоль оси высокой прочности) максимальная поверхностная температура превышает 360 °С, что приводит к термически инициированному усталостному разрушению и отделению крупных частиц износа, которые регистрируются на термограммах как нагретые пятна, расположенные на режущей кромке диска. Поверхностная температура при распиливании однозначно связана с НДС алмаза соотношением времени его взаимодействия с абразивными частицами и периодом вращения распиловочного диска [1, 2, 5, 11].

3. Впервые показано, что при скорости скольжения выше 40 м/с поверхность силикатного стекла и лейкосапфира подвергается локальному терморастрескиванию даже за пределами контактной площадки. Такая локализация разрушения согласуется с распределением фрикционной поверхностной температуры и смещением ее максимума от границы контакта в направлении вектора скорости диска [2, 8, 12, 13].

4. Установлено подобие закономерностей изнашивания исследуемых материалов при трении по гладкому контртелу и закрепленным абразивным частицам. Для обоих видов нагружения характерны: доминирующая роль усталостного разрушения в изнашивании материала, крайне неравномерная глубина распространения микротрещины на различных участках ее длины, периодичность разрушения поверхностного слоя, появление микротрещин усталости на поверхности и под поверхностью трения. Локализуется усталостное разрушение в продольных полосах поверхности трения, которые с течением времени перемещаются перпендикулярно вектору скорости. При этом показано, что глубина распространения трещин усталости изменяется скачкообразно вдоль ее длины в пределах от 0,1 до 5,5 мкм. Неравномерность роста трещин в глубину усиливается с увеличением скорости скольжения [3, 6, 7, 14, 15].

5. Установлено, что изнашивание силикатного стекла при высоких скоростях ($v > 35$ м/с) является результатом одновременного протекания хрупкого скалывания, малоциклового усталости, термомеханического разрушения, кратковременного локального плавления (при критических режимах). Вклад каждого из этих видов изнашивания зависит от мощности трения [3, 4, 6, 10–12, 14].

6. Выявлена зависимость между массовой интенсивностью изнашивания силикатного стекла и максимальной глубиной распространения поверхностных трещин при трении по гладкому диску и диску с закрепленными абразивными частицами. В обоих видах испытаний с увеличением скорости более 25 м/с наблюдается рост как максимальной глубины трещин, так и интенсивности изнашивания. При изнашивании силикатного стекла гладким диском эта зависимость более существенна [3, 6, 12, 13, 15].

7. Распиливание заготовок из исследуемых материалов сопровождается локальным усталостным разрушением слоя, прилегающего к боковым поверхностям распила. Зависимость толщины этого слоя от нагрузки на диск отражается кривой с минимумом. При нагрузке выше 0,6 Н происходит волнообразный изгиб распиловочного диска и реализуется его фрикционное взаимодействие с боковой поверхностью распила, на которой появляются следы адгезионного переноса меди и участки выкрашивания. В результате образуется дефектный слой, удаление которого сопряжено со значительными потерями сырья и затратами времени на обработку [7].

8. Предложены методы совершенствования технологии абразивной обработки оптических и ювелирных материалов, позволяющие снизить отрицательное влияние фрикционного нагрева на качество обрабатываемых поверхностей. Основные рекомендации заключаются в осаждении фторопласта из активной газовой фазы на плоскую поверхность абразивосодержащего диска и увеличение его диаметра [8]. При этом снижается средняя глубина дефектного слоя при распиливании силикатного стекла в 1,5–2,0 раза и увеличивается выход годных изделий на 5–7 %. Снижение потерь массы алмазного сырья при распиливании и обдирке составило до 4 %.

Рекомендации по практическому использованию результатов

На основании апробации результатов диссертационной работы на ЗАО «БелГРАН», ОАО «Рогачевский завод «Диaproектор», ООО «Сапфир-Диамант» рекомендовано использование предложенных способов совершенствования технологической оснастки и оптимизации режимов обработки на оптикообрабатывающих (компания холдинга БелОМО, ОАО «Завод «Оптик») и ювелирных (ОАО «Гомельское ПО «Кристалл») предприятиях. В частности предложены оптимальные режимы и методы совершенствования технологии обработки исследуемых материалов, заключающиеся в увеличении диаметра распиловочного диска и нанесении на его боковую поверхность антифрикционных покрытий, позволяющие уменьшить толщину разрушенного слоя изделия за счет уменьшения тепловой нагруженности зоны трения. При этом снижаются потери дорогостоящего сырья, уменьшается процент отбракованных изделий и сокращаются трудозатраты.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Богданович, П. Н. Разрушение материалов при динамическом контактом нагружении / П. Н. Богданович, Д. В. Ткачук, Д. А. Близнец // *Asta mechanica et automatica*. – 2007. – № 1. – С. 15–18.
2. Ткачук, Д. В. Влияние температурных полей на изнашивание неметаллических материалов при абразивной обработке / Д. В. Ткачук, П. Н. Богданович, Д. А. Близнец // *Трение и износ*. – 2007. – № 6. – С. 604–614.
3. Богданович, П. Н. Особенности изнашивания хрупких неорганических материалов при трении и абразивной обработке / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец, Д. В. Ткачук // *Трение и износ*. – 2009. – № 1. – С. 48–56.
4. Богданович, П. Н. Температурные поля, развивающиеся при резании сапфира и алмаза / П. Н. Богданович, Д. В. Ткачук, Д. А. Близнец // *Инженерно-физический журнал*. – 2009. – № 3. – С. 569–575.
5. Богданович, П. Н. Экспериментальная установка для изучения тепловых процессов в динамическом контакте твердых тел / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец, Д. В. Ткачук // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2009. – № 8. – С. 17–22.
6. Богданович, П. Н. Изнашивание силикатного стекла при высоких скоростях / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец, Д. В. Ткачук // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2010. – № 4 (5). – С. 73–78.
7. Близнец, Д. А. Изнашивание неорганических материалов при распиловке абразивным инструментом / Д. А. Близнец, П. Н. Богданович // *Трение и износ*. – 2016. – № 6. – С. 721–727.
8. Близнец, Д. А. Конечноэлементное моделирование процесса распиловки твердых и сверхтвердых материалов / Д. А. Близнец, П. Н. Богданович, О. И. Якубович // *Механика. Исследования и инновации: междунар. сб. науч. тр.* / Белорусский государственный университет транспорта. – Гомель, 2017. – Вып. 10. – С. 17–23.
9. Bogdanovich, P. N. Theoretical and experimental analysis of the sawing process for hard and ultra-hard materials / P. N. Bogdanovich, D. A. Bliznets, A. O. Shimanovsky, V. I. Yakubovich // *International journal of mechanical engineering and robotics research*. – 2018. – Vol. 7 – № 2. – P. 120–125.

Статьи в сборниках материалов конференций и семинаров

10. Близнец, Д. А. Механизмы разрушения твердых неметаллических материалов при трении и абразивной обработке / Д. А. Близнец // *Молодежь и XXI век : материалы II междунар. молодежной науч. конф., Курск, 7–9 апр. 2010 г. : в 3 ч.* / Курский государственный технический университет ; редкол.: С. Г. Емельянов [и др.]. – Ч. 1 – Курск, 2010. – С. 75–79.
11. Близнец, Д. А. Закономерности протекания тепловых процессов при распиловке алмаза и сапфира / Д. А. Близнец // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф.,*

Могилев, 22–23 апр. 2010 г. : в 3 ч. / Белорусско – Российский университет ; редкол.: И. С. Сазонов [и др.]. – Ч. 1. – Могилев, 2010. – С. 168–169.

12. Богданович, П. Н. Абразивное изнашивание неорганических материалов / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец, Д. В. Ткачук // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сборник материалов II междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27–28 мая 2010 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: Б. М. Хрусталеv [и др.]. – Минск, 2010. – С. 233–235.

13. Близнец, Д. А. Особенности разрушения аморфных неметаллических материалов в процессе трения / Д. А. Близнец // Трибофатика (tribo-fatigue) : труды VI междунар. симпозиума по трибофатике МСТФ 2010. Минск, 25 окт.–1 ноя. 2010 г. : в 2 ч. / Белорусский государственный университет ; редкол.: М. А. Журавков [и др.]. – Ч. 1. – Минск, 2010. – С. 521–525.

14. Богданович, П. Н. Особенности абразивного изнашивания хрупких материалов при высоких скоростях / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец // Трибофатика (tribo-fatigue) : труды VI междунар. симпозиума по трибофатике МСТФ 2010, Минск, 25 окт.–1 ноя. 2010 г. : в 2 ч. / Белорусский государственный университет ; редкол.: М. А. Журавков [и др.]. – Ч. 1 – Минск, 2010. – С. 545–548.

15. Богданович, П. Н. Закономерности усталостного разрушения неорганических материалов при циклическом нагружении / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец // Conference proceedings VI-th International Symposium on Mechanics of Materials and Structures Augustow, may 30–june 2 2011. / Белостокский государственный университет ; – Augustow, 2011. – С. 36–37.

16. Шалупаев, С. В. Численное моделирование и тепловизионные измерения лазерного термораскалывания силикатных стекол / С. В. Шалупаев, П. Н. Богданович, Ю. В. Никитюк, А. А. Середв, Д. А. Близнец // Научный семинар по оптике и теоретической физике, посвященный 70-летию со дня рождения А. Н. Сердюкова [материалы], Гомель, 21 мая 2014 г. / Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины ; редкол.: А. В. Рогачев [и др.]. – Гомель, 2014. – С. 246–250.

Тезисы докладов

17. Ткачук, Д. В. Влияние температурных полей на изнашивание неметаллических материалов при абразивной обработке / Д. В. Ткачук, П. Н. Богданович, Д. А. Близнец // Поликомтриб-2007 : тез. докл. науч.-техн. конф. «Полимерные композиты и трибология», Гомель, 16–19 июля 2007 г. / ИММС НАН Беларуси им. В.А. Белого ; редкол.: В. Н. Адериxа [и др.] – Гомель, 2007. – С. 192–193.

18. Богданович, П. Н. Особенности абразивного изнашивания хрупких материалов при высоких скоростях / П. Н. Богданович, Д. А. Близнец // Поликомтриб-2011 : тез. докл. науч.-техн. конф. «Полимерные композиты и трибология», Гомель, 27–30 июня 2011 г. / ИММС НАН Беларуси им. В.А. Белого ; редкол.: В. Н. Адериxа [и др.] – Гомель, 2011. – С. 44.

РЭЗІЮМЭ

Блізнец Дзмітрый Аляксандравіч

«Фрыкцыйнае награванне і зношванне пры абразіўнай апрацоўцы аптычных і ювелірных матэрыялаў»

Ключавыя словы: сілікатнае шкло, лейкасапфір, алмаз, успышкі тэмпературы, тэмпературныя палі, паверхні трэння, фрыкцыйнае нагружэнне, абразіўнае зношванне, інтэнсіўнасць зношвання, разбурэнне праз стомленасць, мікрарасколіна праз стомленасць.

Мэта працы: высветленне заканамернасцяў фрыкцыйнага ўзаемадзеяння пры абразіўнай апрацоўцы аптычных і ювелірных матэрыялаў з улікам цеплавой нагружанасці слізготнага кантакту для ажыццяўлення кантролю і кіравання якасцю зношваемых паверхняў.

Метады даследавання: трыбатэхнічныя высакахуткасныя выпрабаванні, цеплавізійны метады, метады опытка-электроннага сканіравання; лазерная канфакальная і растрвая электронная мікраскапіі.

Атрыманыя вынікі: даследаваны тэмпературныя палі пры абразіўнай апрацоўцы сілікатнага шкла, лейкасапфіру і алмазу. Тэмпература пры распілоўцы лейкасапфіру дасягае максімуму на адлегласці ў 0,8–1,3 мм наперадзе ад зоны фрыкцыйнага кантакту. У гэтай жа зоне зарэгістравана тэрмарасколванне сілікатнага шкла. Пры высоканагружаным кантакце паверхневая тэмпература алмазу перавышае за 360 °С, пры гэтым магчыма яго лакальная графітызацыя і аддзяленне буйных часціц зносу.

Даследаваныя кінетыка, механізмы разбурэння і заканамернасці зношвання сілікатнага шкла і лейкасапфіру пры высакахуткаснай абразіўнай апрацоўцы. Адзначана падабенства механізмаў разбурэння даследуемых матэрыялаў пры трэнні па замацаваным абразіве і гладкім контрцэле. Выяўленая нераўнамернасць распаўсюджвання паверхневых расколін стомленасці, якія ўтвараюцца ў аптычных матэрыялах пры трэнні. Высветлена сувязь паміж інтэнсіўнасцю зношвання сілікатнага шкла і глыбінёй паверхневых расколін. Пры фрыкцыйным нагружэнні даследуемых матэрыялаў магчымая рэалізацыя некалькіх механізмаў зношвання: крохкае сколванне, малацыклавая стомленасць, тэрмамеханічнае разбурэнне, лакальнае плаўленне. Распілоўванне даследуемых матэрыялаў суправаджаецца разбурэннем праз стомленасць іх бакавых паверхняў у выніку трэння аб плоскую паверхню дыска. Таўшчыня дэфектнага пласта, які ўтвараецца пры гэтым, неманатонна залежыць ад нармальнай нагрузкі.

Вынікі даследаванняў дазваляюць вызначыць аптымальныя рэжымы апрацоўкі даследуемых матэрыялаў і тэхналагічныя дасканаласці, пры якіх забяспечваюцца высокая прадукцыйнасць тэхналагічнага працэсу і належная якасць паверхні аптычных і ювелірных вырабаў. Выхад прыдатных вырабаў з сілікатнага шкла павышаецца да 7 %. Зніжэнне страт масы алмазнай сыравіны пры апрацоўцы дасягае да 4 %.

Галіна прымянення: аптычнае прыборабудаванне, машынабудаванне, ювелірная прамысловасць.

РЕЗЮМЕ

Близнец Дмитрий Александрович

«Фрикционный нагрев и изнашивание при абразивной обработке оптических и ювелирных материалов»

Ключевые слова: силикатное стекло, лейкосапфир, алмаз, вспышки температуры, температурные поля, поверхности трения, фрикционное нагружение, абразивное изнашивание, интенсивность изнашивания, усталостное разрушение, усталостная микротрещина.

Цель работы: установление закономерностей фрикционного взаимодействия при абразивной обработке оптических и ювелирных материалов с учетом тепловой нагруженности скользящего контакта для осуществления контроля и управления качеством изнашиваемых поверхностей.

Методы исследования: триботехнические высокоскоростные испытания, тепловизионный метод, метод оптико-электронного сканирования, лазерная конфокальная и растровая электронная микроскопии.

Полученные результаты: исследованы температурные поля при абразивной обработке силикатного стекла, лейкосапфира и алмаза. Температура при распиливании лейкосапфира достигает максимума на расстоянии 0,8–1,3 мм впереди зоны фрикционного контакта. В этой же области зарегистрировано терморастрескивание силикатного стекла. При высоконагруженном контакте поверхностная температура алмаза превышает 360 °С, при этом возможна его локальная графитизация и отделение крупных частиц износа.

Исследованы кинетика, механизмы разрушения и закономерности изнашивания силикатного стекла и лейкосапфира при высокоскоростной абразивной обработке. Отмечено подобие механизмов разрушения исследуемых материалов при трении по закрепленному абразиву и гладкому контртелу. Выявлена неравномерность распространения поверхностных трещин усталости, образующихся в оптических материалах при трении. Установлена связь между интенсивностью изнашивания силикатного стекла и глубиной поверхностных трещин. При фрикционном нагружении исследуемых материалов возможно протекание нескольких механизмов изнашивания: хрупкое скалывание, малоцикловая усталость, термомеханическое разрушение, локальное плавление. Распиливание исследуемых материалов сопровождается усталостным разрушением их боковых поверхностей в результате трения о плоскую поверхность диска. Толщина образующегося при этом дефектного слоя немонотонно зависит от нормальной нагрузки.

Результаты исследований позволяют выбрать оптимальные режимы обработки исследуемых материалов и технологические совершенства, при которых обеспечиваются высокая производительность технологического процесса и надлежащее качество поверхности оптических и ювелирных изделий. Выход годных изделий из силикатного стекла повышается до 7 %. Снижение потерь массы алмазного сырья при обработке достигает 4 %.

Область применения: оптическое приборостроение, машиностроение, ювелирная промышленность.

SUMMARY

Bliznets Dmitriy Aleksandrovich

“Frictional Heating and Wear during Abrasive Machining of Optical and Jewelry Materials”

Keywords: silicate glass, leucosapphire, diamond, temperature flashes, temperature fields, friction surfaces, frictional loading, abrasive wear, wear rate, fatigue fracture, fatigue microcrack.

Aim of the study: determining regularities of friction contact during the abrasive machining of optical and jewelry materials with account for the thermal loading of the sliding contact in order to perform the monitoring and quality control of the surfaces being worn out.

Investigation techniques: high-speed tribotests, thermal-imaging technique, optical-electron scanning technique, confocal laser microscopy and scanning electron microscopy.

Results: Temperature fields, which arise during the abrasive machining of silicate glass, leucosapphire and diamond, have been studied. It has been found that the temperature arising during the cutting of leucosapphire reaches its maximum value some distance (0.8–1.3 mm) ahead of the friction contact zone. In this zone, the thermal-induced cracking of silicate glass is also observed. Under severe loading conditions, the surface temperature of diamond exceeds 360°C, so that the local graphitization of diamond and the removal of coarse wear debris may occur.

The kinetics and mechanisms of the fracture of silicate glass and leucosapphire along with the regularities of their wear during high-speed abrasive machining have been studied. It has been noted that the mechanisms of the fracture of the materials under study in two-body abrasion and in friction against a smooth counterface are similar. The nonuniformity of the propagation of surface fatigue cracks, which appear in the optical materials under friction, has been found. A correlation between the wear rate of silicate glass and the depth of the surface cracks has been found. During the friction of the materials under study, several wear mechanisms can occur, namely, brittle spalling, low-cycle fatigue, thermo-mechanical fracture and local melting. The cutting of the materials is accompanied by the fatigue fracture of their side surfaces due to friction against the flat surface of the disc. The thickness of the resulting defect layer depends nonmonotonously on the normal load.

The study results make it possible to choose optimum conditions for the machining of the materials and process improvements, which ensure a high process performance and required quality of surfaces of optical components and pieces of jewelry.

Field of application: optical instrument-making, machine building, jewelry industry.

Научное издание

БЛИЗНЕЦ Дмитрий Александрович

**ФРИКЦИОННЫЙ НАГРЕВ И ИЗНАШИВАНИЕ
ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ
ОПТИЧЕСКИХ И ЮВЕЛИРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.04 – трение и износ в машинах

Подписано в печать 24.08.2018 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 1,16. Тираж 60 экз. Зак. 3048.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 2/104 от 01.04.2014.
Ул. Кирова, 34, 246653, г. Гомель.