

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 621.937

**КОРЗУН**  
Павел Олегович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ  
ЗАГОТОВОК РАСПИЛОВОЧНЫХ ДИСКОВ, ШАРЖИРОВАННЫХ  
С УЛЬТРАЗВУКОМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.03.01 – Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Минск, 2010

Работа выполнена на кафедре «Конструирование и производство приборов»  
Белорусского национального технического университета

Научный руководитель

Киселев Михаил Григорьевич, заслуженный работник образования Республики Беларусь, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов», Белорусский национальный технический университет

Официальные оппоненты:

Мрочек Жорж Адамович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Белорусский национальный технический университет;

Сенюць Владимир Тадеушевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории наноструктурных и сверхтвердых материалов ГНУ «Объединенный институт машиностроения» НАН Беларуси

Оппонирующая организация –

Белорусское оптико-механическое объединение (БелОМО)

Защита состоится «30» апреля 2010 года в 14 часов 00 минут на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости 65, корп.1, ауд. 202, тел. 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «30» марта 2010 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций  
доктор технических наук, профессор

\_\_\_\_\_ Девойно О.Г.

© Корзун П.О., 2010

© БНТУ, 2010

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Для выполнения операций механической обработки заготовок из твердых и сверхтвердых неметаллических материалов используются инструменты, на рабочих поверхностях которых тем или иным способом сформировано алмазосодержащее покрытие. У распиловочных дисков, предназначенных для механического распиливания монокристаллов алмаза, такое покрытие на их боковых поверхностях получают методом шаржирования в них зерен алмазного микропорошка. Значение их эксплуатационных показателей (режущая способность, стойкость, качество площадок распиленных заготовок), определяется строением и прочностными характеристиками этого алмазосодержащего покрытия. По существующей технологии шаржированию подвергаются заготовки дисков в исходном (после прокатки бронзовой ленты) состоянии их поверхностей, которые имеют малую по сравнению с размером алмазных зерен высоту микронеровностей, что препятствует эффективному протеканию процесса шаржирования. Поэтому применение целенаправленной подготовки микрорельефа поверхности исходных заготовок дисков оправдано рассматривать как до сих пор не в полной мере использованный резерв повышения качества их шаржирования, а, соответственно, и характеристик получаемого на них алмазосодержащего покрытия. В этой связи исследование особенностей формирования алмазосодержащего покрытия на подготовленной поверхности заготовки диска методом шаржирования с ультразвуком и разработка соответствующей технологии изготовления распиловочных дисков, обеспечивающей повышение эксплуатационных показателей получаемых инструментов, представляют собой актуальные научно-технические задачи, имеющие практическое значение для алмазобрабатывающего производства.

### **Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами**

Работа выполнялась в рамках задания государственной программы ориентированных фундаментальных научных исследований «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии» ГБ 06-24 «Исследование влияния интенсивных акустических полей на процесс формообразования изделий из труднообрабатываемых материалов и разработка высокоинтенсивных технологий их обработки», с 2006 по 2010 гг., (№ гос. рег. 20063033), а также в рамках гранта ГБ 09-19 «Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков путем совершенствования технологии их шаржирования», 2009 г. (№ гос.рег. 20091495).

### **Цель и задачи исследования**

Целью данной работы является разработка технологии подготовки микрорельефа поверхности заготовок распиловочных дисков, шаржированных с ультразвуком, обеспечивающей повышение эксплуатационных показателей получаемых инструментов (режущая способность, стойкость, качество распиленной поверхности и уровень устойчивости к деформации продольного изгиба).

Объектом исследования является распиловочный диск – инструмент, предназначенный для механического распиливания монокристаллов алмаза.

Предметом исследования является процесс формирования алмазосодержащего покрытия на боковых поверхностях распиловочных дисков методом шаржирования с использованием предварительной подготовки микрорельефа поверхности их исходных заготовок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

– изучить строение алмазосодержащего покрытия, формируемого на поверхности распиловочного диска по традиционной технологии (без подготовки микрорельефа поверхности заготовок). Установить положительные эффекты, связанные с подготовкой микрорельефа исходной поверхности заготовки диска, и установить механизм их влияния на условия формирования и прочностные характеристики получаемого на ней алмазосодержащего покрытия;

– разработать математическую модель процесса перекачивания алмазного зерна между поверхностями деформирующего инструмента и заготовки диска, учитывающую влияние ее микрорельефа, по результатам которых установить соотношение между его параметрами (высота микронеровностей  $R_z$ , угол раскрытия впадин  $2\alpha$ ) и размером алмазного зерна ( $a$ ), при котором перекачивание последнего в зоне обработки будет исключено;

– определить влияние вида жидкой составляющей алмазной суспензии и геометрических параметров характерных видов микрорельефа на условия контактирования суспензии с поверхностью распиловочного диска по критериям наибольшей удельной площади и емкости микрорельефа, а также прочности сцепления твердой пленки, образовавшейся при высыхании суспензии, по результатам которых установить оптимальный вид жидкой составляющей и способ подготовки поверхности;

– разработать и создать экспериментальное оборудование для обработки заготовок распиловочных дисков, обеспечивающие получение требуемых параметров микрорельефа, и провести экспериментальные исследования по оценке влияния вида и параметров микрорельефа подготовленной поверхности заготовки диска на абразивную способность и износостойкость получаемого на ней алмазосодержащего покрытия;

– провести экспериментальные исследования и установить влияние режимов обработки лепестковым кругом и виброударной обработки свободным абразивом заготовок распиловочных дисков на их режущую способность, стойкость, уровень устойчивости к деформации продольного изгиба, и определить оптимальный способ и режимы обработки, обеспечивающие

наибольшее повышение этих показателей по сравнению с инструментом, изготовленным по традиционной технологии;

– провести промышленные испытания распиловочных дисков, изготовленных по разработанной технологии, и внедрить результаты работы в производство.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты экспериментальных исследований строения алмазосодержащего покрытия, сформированного на поверхности распиловочного диска, на основании которых определены положительные эффекты, связанные с подготовкой микрорельефа поверхности исходных заготовок распиловочных дисков, позволяющие повысить прочностные характеристики сформированного на их поверхностях алмазосодержащего покрытия за счет ограничения в процессе ее шаржирования подвижности (перекатывания) алмазных зерен в зоне обработки, снижения усилия их внедрения в материал диска при увеличении прочности закрепления и повышения прочности сцепления твердой пленки с металлической поверхностью заготовки.

2. Результаты математического моделирования процесса перекатывания алмазного зерна между поверхностями деформирующего инструмента и заготовки диска, учитывающего влияние ее микрорельефа, позволившие установить соотношение между его параметрами (высота микронеровностей  $Rz$  и угол раскрытия впадин  $2\alpha$ ) и размером алмазного зерна ( $a$ ), при котором его перекатывание в зоне обработки будет исключено.

3. Результаты исследований по влиянию вида жидкой составляющей алмазной суспензии и геометрических параметров характерных видов микрорельефа на условия контактирования суспензии с поверхностью распиловочного диска по критериям наибольшей удельной площади и емкости микрорельефа, а также прочности сцепления твердой пленки, образовавшейся при высыхании суспензии, что позволило установить оптимальный вид жидкой составляющей и способ подготовки поверхности.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния вида и параметров микрорельефа подготовленной поверхности заготовки диска на абразивную способность и износостойкость получаемого на ней алмазосодержащего покрытия, на основании которых определены способы поверхностной обработки заготовок дисков, обеспечивающие повышение эксплуатационных показателей, по сравнению с покрытием, сформированным без предварительной подготовки поверхности.

5. Результаты экспериментальных исследований по влиянию режимов обработки лепестковым кругом и виброударной обработки свободным абразивом заготовок распиловочных дисков на их режущую способность, стойкость, уровень устойчивости к деформации продольного изгиба, позволившие определить

оптимальный способ и режимы обработки, обеспечивающие наибольшее повышение эксплуатационных показателей по сравнению с инструментом, изготовленным по традиционной технологии.

#### **Личный вклад соискателя**

В ходе выполнения диссертационной работы соискателем лично решены следующие задачи: получены данные о строении алмазосодержащего покрытия, формируемого на поверхности распиловочного диска методом шаржирования с ультразвуком; разработаны математическая и геометрическая модели процессов, протекающих при формировании алмазосодержащего покрытия на подготовленной поверхности заготовки диска; установлен механизм положительного влияния подготовки микрорельефа поверхности заготовок диска на прочностные характеристики формируемого на них алмазосодержащего покрытия; проведены экспериментальные исследования влияния различных видов масел, входящих в состав алмазной суспензии, на прочность сцепления алмазосодержащего покрытия с поверхностью диска; предложены рациональные способы поверхностной обработки заготовок распиловочных дисков и созданы установки для их реализации; проведены экспериментальные исследования, по результатам которых определены оптимальный способ и режимы обработки заготовок дисков, обеспечивающие наибольшее повышение эксплуатационных показателей получаемых инструментов в сравнении с изготовленными по традиционной технологии; разработан технологический процесс изготовления распиловочных дисков с использованием технологии подготовки поверхности исходных заготовок.

Участие соавторов в совместных работах: М.Г. Киселев, как научный руководитель, оказывал практическую помощь и содействие на всех этапах выполнения настоящей работы. А.В. Дроздов участвовал в проведении экспериментальных исследований по определению технологических показателей процесса обработки боковых поверхностей распиловочных дисков лепестковыми абразивными кругами, а также, совместно с Летыч В.А., участвовал в проведении исследований по оценке влияния различных масел, входящих в состав алмазной суспензии, на прочность сцепления получаемого алмазосодержащего покрытия с поверхностью распиловочного диска. Павич Т.П. участвовала в проведении исследований по определению вида микрорельефа обработанной поверхности, обеспечивающего её наибольшую площадь и емкость при контактировании с жидкостью.

#### **Апробация результатов диссертации**

Основные положения и результаты работы были доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах: 6-я Международная НТК «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» (Новополоцк, 2007), VIII Международная НТК студентов,

магистрантов и аспирантов «Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления» (Гомель, 2008), 8-я НТК «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2008), Седьмая международная научно-техническая конференция «Наука – образованию, производству, экономике» (Минск, 2009).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 научных работах, в том числе в 6 статьях, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 3 авторских листа, а так же в 5 статьях и тезисах докладов на научных конференциях.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации 136 страниц. Работа содержит 102 страницы машинописного текста, 43 рисунка, 7 таблиц, список использованных источников в количестве 91, включая 11 авторских работ, и 7 приложений.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

В **первой главе** представлены основные сведения об операции механического распиливания монокристаллов алмаза и отмечены её специфические особенности. Исходя из этого, сформулированы требования, предъявляемые к применяемому инструменту – распиловочному диску, и представлены основные этапы его изготовления. Установлено, что определяющая роль в обеспечении высокого уровня эксплуатационных показателей распиловочных дисков принадлежит этапу формирования на боковых поверхностях их исходных заготовок алмазосодержащего покрытия методом шаржирования. Проведен анализ предшествующих исследований, посвященных изучению процесса шаржирования поверхностей алмазными (абразивными) зернами, направленных на повышение качества выполнения этой операции. В частности, работами Киселева М.Г., Минчени В.Т., Савицкого С.С., Новикова А.А. убедительно доказана высокая эффективность применения энергии ультразвука с целью повышения качества шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков, а, соответственно, и эксплуатационных показателей получаемых инструментов.

Несмотря на очевидность того обстоятельства, что шероховатость поверхности заготовок существенно влияет на условия протекания процесса её шаржирования, в предшествующих исследованиях этот вопрос незаслуженно остался без должного внимания. По этой причине, отсутствуют научно обоснованные рекомендации по назначению (нормированию) параметров шероховатости поверхности заготовки диска, при которых сформированное на ней мето-

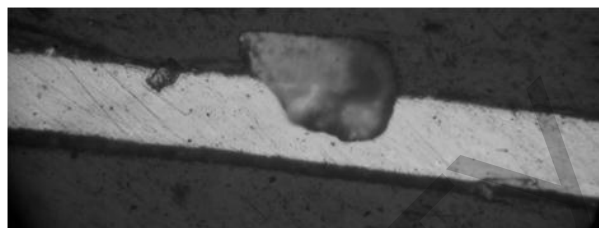
дом шаржирования алмазосодержащее покрытие обладает высокими эксплуатационными показателями.

На основании обобщенного анализа изложенного материала сформулированы цель и задачи работы.

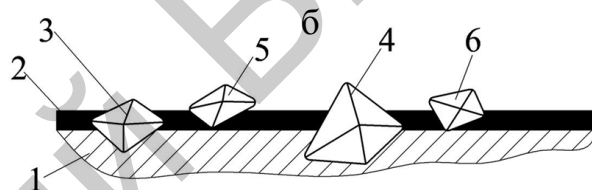
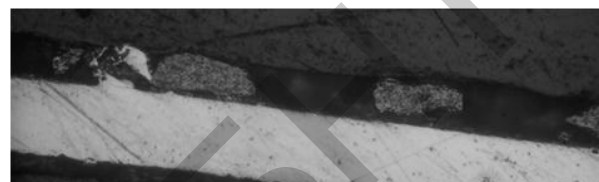
**Вторая глава** посвящена теоретико-экспериментальным исследованиям влияния микрорельефа подготовленной поверхности заготовки диска на условия формирования на ней алмазосодержащего покрытия.

На основе результатов исследований состояния алмазосодержащего покрытия, сформированного на поверхности распиловочных дисков после их шаржирования и термоправки (рисунок 1, а, б), получены данные о его строении. Установлено, что оно является однослойным (рисунок 1, в), состоящим из твердой пленки, образовавшейся в результате высыхания касторового масла (оно входит в состав алмазной суспензии при шаржировании), и алмазных зерен. При этом часть из них (зерна 3 и 4), благодаря внедрению и закреплению в поверхности диска (шаржированию), выполняют в полученном покрытии роль своеобразных армирующих элементов между ней и покрывающей её твердой пленкой, повышая тем самым его прочностные характеристики. Другая часть зерен (зерна 5 и 6) располагается на поверхности заготовки и удерживается в покрытии только твердой пленкой. Поэтому прочность их закрепления в нем будет определяться как прочностью самой пленки, так и прочностью её сцепления с металлической поверхностью заготовки.

На уровне рабочей гипотезы обоснованы положительные эффекты, связанные с подготовкой микрорельефа поверхности заготовки и направленные на повышение прочностных характеристик получаемого на ней алмазосодержащего покрытия. В частности, показано, что за счет такой подготовки необходимо обеспечить условия, резко ограничивающие явление перекатывания алмазных зерен в зоне обработки, препятствующее их шаржированию; минимизировать необходимый для их внедрения в поверхность заготовки уровень силового нагружения при одновременном увеличении прочности закрепления в ней, что в совокупности повысит качество ее шаржирования; обеспечить наибольшую



а



в

а – фотография поперечного шлифа распиловочного диска, иллюстрирующая зерно внедрившееся в его материал;  
б – фотография поперечного шлифа распиловочного диска, иллюстрирующая расположение зерен в твердой пленке (увеличение 1000);

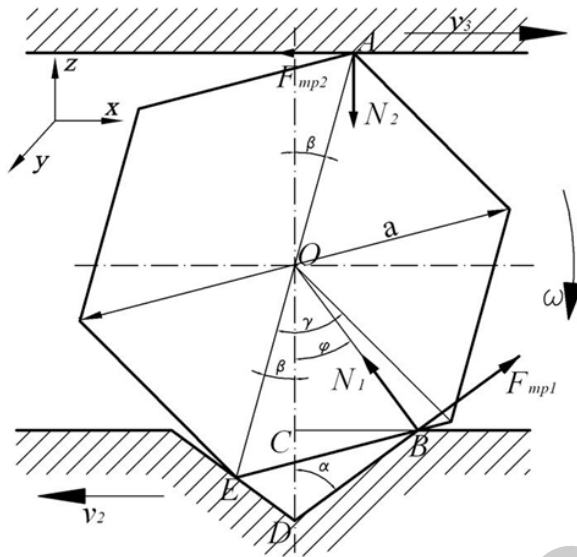
в – схема строения получаемого покрытия

**Рисунок 1 – Данные о строении алмазосодержащего покрытия на поверхности распиловочного диска**



площадь контакта с жидкой составляющей, входящей в состав алмазной суспензии, что позволит повысить прочность сцепления твердой пленки с подготовленной поверхностью распиловочного диска. Исходя из этого, были проведены исследования по определению вида и параметров микрорельефа подготовленной поверхности заготовки диска, при которых обеспечивается выполнение каждого из перечисленных требований.

На рисунке 2 представлена расчетная схема, положенная в основу определения условия устойчивости алмазного зерна в зоне обработки, т.е. отсутствия его перекатывания. Зерно моделируется жестким промежуточным элементом в виде шестиугольника (рассматривается плоская задача), который находится в силовом контакте с шероховатой поверхностью заготовки (она моделируется впадиной глубиной  $Rz$  и углом раскрытия  $2\alpha$ ) и гладкой поверхностью деформирующего инструмента.



**Рисунок 2 – Расчетная схема для определения условий устойчивости алмазного зерна в зоне обработки**

Поверхности совершают поступательное движение с одинаковой скоростью  $v_1$  и  $v_3$  в противоположных направлениях, что соответствует условию наибольшей подвижности промежуточного элемента, т.е. его вращательному движению вокруг центра масс (точка  $O$ ) относительно оси  $Oy$ .

Решением системы уравнений равновесия сил и моментов сил, действующих на промежуточный элемент относительно оси  $Oy$ , получены зависимости для расчета угла раскрытия впадины  $2\alpha$  и минимального значения её глубины  $Rz_{min}$ , при которых его перекатывание будет отсутствовать:

$$2\alpha = 2 \cdot \left( 90^\circ - \arctg \left( \frac{\mu_1 - \mu_2}{1 + \mu_1 \cdot \mu_2} \right) \right) = 129^\circ 30', \quad (1)$$

$\mu_1 = 0,6$  и  $\mu_2 = 0,1$  – коэффициенты трения между алмазом и бронзой и алмазом и сталью, соответственно;

$$Rz = \frac{a}{2} \cdot \frac{\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) \cdot \cos(\alpha) \cdot \text{ctg}(\alpha)}{\sin\left(\alpha - \beta + \frac{\gamma}{2}\right)}, \quad (2)$$

где  $a$  – номинальный размер алмазного зерна;  
 $\beta$  – угол наклона оси зерна относительно оси лунки;  
 $\gamma$  – угол, определяемый числом граней многоугольника.

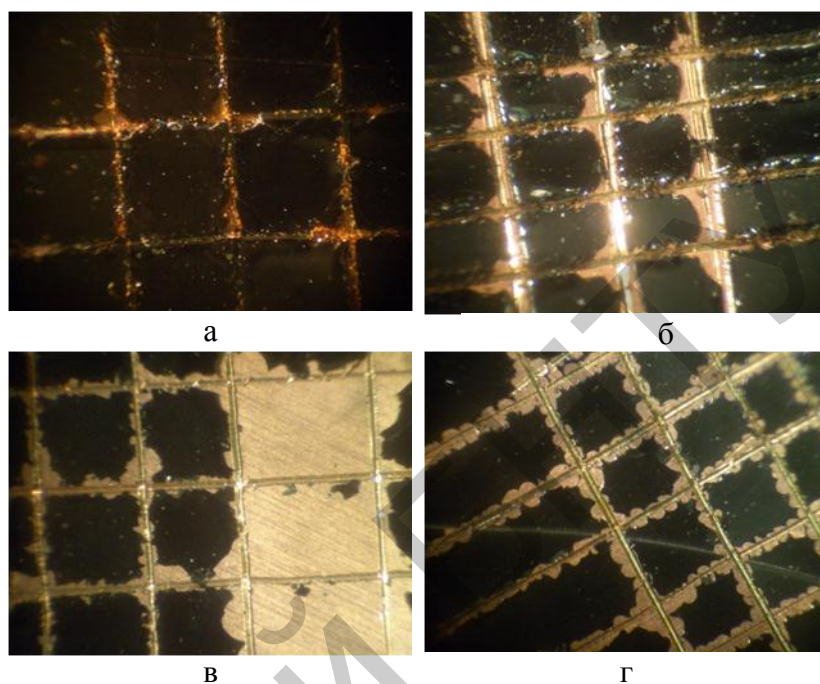
На основе численного исследования полученных зависимостей установлено, что при  $2\alpha = 130^\circ$ , перекатывание зерна данного размера ( $a$ ) с углом при

вершине  $120^\circ$  будет отсутствовать, когда  $Rz/a = 0,11$ .

Цель физического моделирования процесса внедрения алмазного зерна в подготовленную поверхность диска заключалась в определении параметров её микрорельефа, при которых для погружения зерна определенного размера на заданную относительно поверхности выступов глубину требуется приложить наименьшую нагрузку, при одновременном обеспечении наибольшей прочности его закрепления в материале заготовки, т.е. обеспечить наилучшие условия для его шаржирования. В этой серии экспериментальных исследований алмазное зерно моделировалось керамическим шариком диаметром 8 мм, который при различных режимах его нагружения (однократный удар, виброударное нагружение) внедрялся в поверхность пластилинового образца (модель жесткопластического основания). Внедрение осуществлялось как в гладкую поверхность образца, так и в предварительно сформированную на ней коническую лунку, определенной глубины, с углом раскрытия  $130^\circ$ . При этом определялась прочность закрепления шарика в материале образца, а также, путем снятия слепков с полученных отпечатков, определялся характер течения пластилина в зонах его контакта с поверхностью шарика в процессе внедрения. На основе анализа полученных результатов установлено, что критерием оптимизации параметров микрорельефа шаржируемой поверхности является условие обеспечения минимального объема контактных пластических деформаций её материала при погружении в неё зерна на заданную глубину, но достаточного для формирования механического контакта по всей поверхности внедрившейся части зерна, чем достигается наибольшая прочность его закрепления в материале подложки. Расчетами, проведенными с помощью программ *MathCad* и *AutoCad*, установлено, что при угле раскрытия лунки  $2\alpha = 130^\circ$  указанное условие обеспечивается при  $Rz/a=0,14$ .

На прочностные характеристики алмазосодержащего покрытия существенное влияние оказывает прочность сцепления твердой пленки, образовавшейся в результате высыхания касторового масла, с металлической поверхностью заготовки диска. Вместе с тем, отсутствуют сведения по использованию других видов масел, входящих в состав алмазной суспензии. Это обстоятельство явилось основанием для проведения серии экспериментальных исследований по оценке прочности сцепления с поверхностью диска алмазосодержащего покрытия, получаемого с использованием различных видов масел. Помимо касторового использовались подсолнечное, льняное и оливковое масла, которые существенно различались своими характеристиками. Используя метод свободно лежащей капли на горизонтально расположенной поверхности заготовки диска, были определены величина краевого угла смачивания у исследуемых видов масел. Установлено, что наибольшую степень смачиваемости имеет касторовое масло, затем льняное, подсолнечное и оливковое. Для сравнительной оценки прочности сцепления сформированных покрытий с поверхностью диска

был использован метод решетчатых надрезов (рисунок 3). На основе анализа полученных результатов установлено, что наибольшую прочность сцепления с поверхностью диска имеют твердые покрытия, полученные с использованием касторового и подсолнечного масел, меньшую – с применением оливкового и льняного масел. При наличии в масле зерен алмазного микропорошка во всех случаях приводит к повышению прочности сцепления алмазосодержащего покрытия с поверхностью диска. При этом наибольшее значение этот показатель имеет у алмазосодержащего покрытия, полученного с использованием традиционно применяемого касторового масла, которое в сравнении с другими исследованными маслами, является невысыхающим, имеет наибольшую вязкость и температуру вспышки и обеспечивает наибольшую смачиваемость поверхности диска.

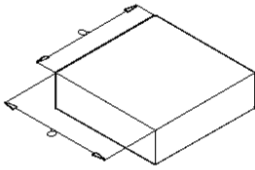
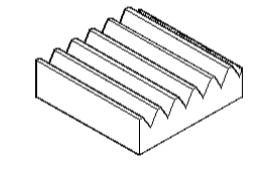
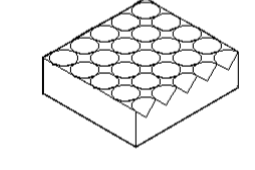
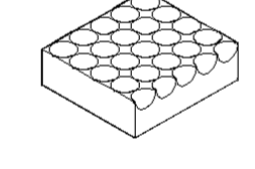


а – касторовое масло, б – подсолнечное масло,  
в – оливковое, г – льняное (увеличение 100)

**Рисунок 3 – Фотографии решеток надрезов на покрытиях, полученных на поверхности распиловочного диска с использованием различных масел**

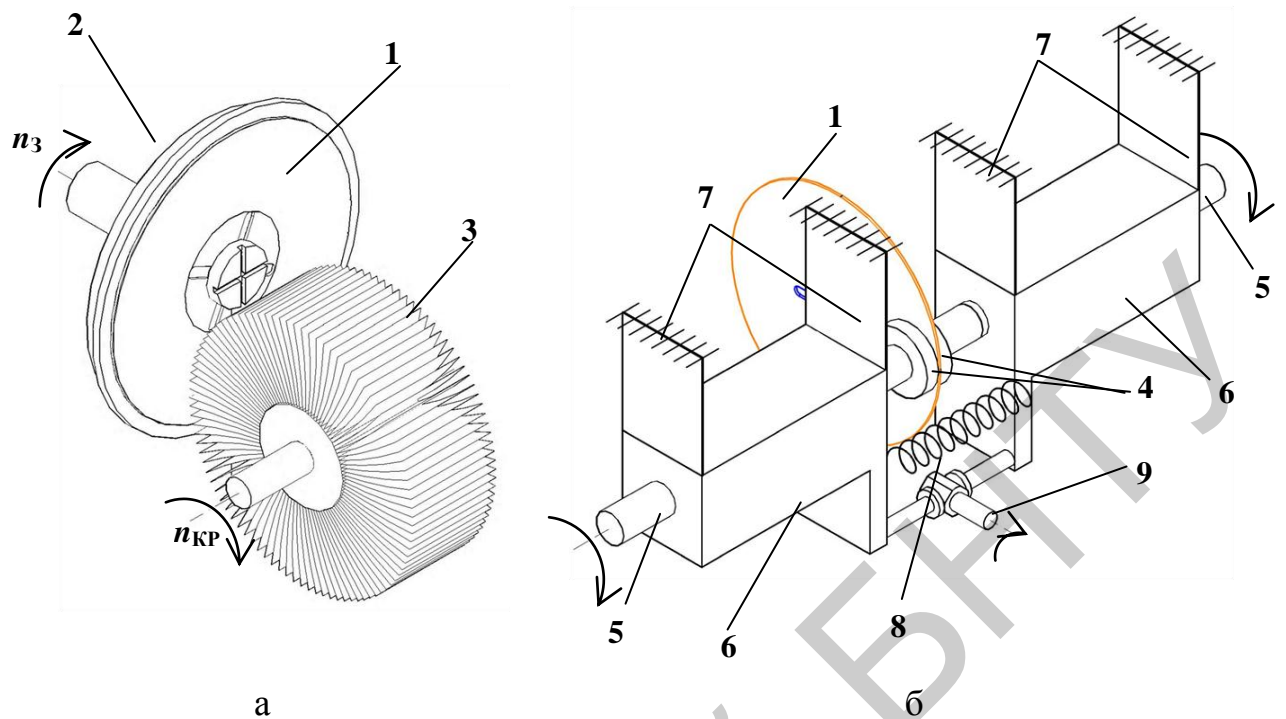
На основе геометрического моделирования характерных видов микро- рельефа на поверхности заготовки, присущих различным способам её обработки (таблица 1), проанализировано их влияние на её удельную площадь и емкость. На основе численного исследования полученных зависимостей установлено, что при одинаковых высотных и шаговых параметрах микро- рельефа, оптимальным с точки зрения обеспечения наибольшей удельной площади и емкости при взаимодействии с жидкостью является микро- рельеф в виде множества лунок конической формы. Меньшим значением этих параметров характеризуется микро- рельеф в виде однонаправленных рисок, а самое низкое имеет микро- рельеф в виде множества лунок сферической формы. Несмотря на то, что реальный микро- рельеф обработанной поверхности имеет гораздо более сложную, чем в принятых моделях, структуру и геометрию, полученные результаты послужили основой для принятия решения по выбору рациональных способов обработки заготовок с учетом формирования на них микро- рельефа определенного вида.

Таблица 1 – Геометрические модели видов микрорельефа на поверхности заготовки, соответствующие различным способам её обработки, и полученные зависимости для вычисления коэффициентов приращения ее площади и объема

Вид микрорельефа	Описание	Способ обработки	Коэффициент приращения площади	Коэффициент приращения объема впадин
	исходная (гладкая) поверхность	Без обработки	$K_{S1} = 1$	$K_{V1} = 1$
	параллельные следы обработки, имеющие треугольный профиль	Обработка лезвийным инструментом, инструментом со связанным абразивом	$K_{S2} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{1}{\sin a} \right)$ , где $a$ - половина угла раскрытия лунки	$K_{V2} = \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{\operatorname{tga}} + 1$
	множество, не перекрывающих друг друга лунок конической формы	Пескоструйная обработка, виброударная обработка свободным абразивом	$K_{S3} = \frac{\pi}{4 \cdot \sin a} + 1 - \frac{\pi}{4}$	$K_{V3} = \frac{\pi}{12} \cdot \frac{1}{\operatorname{tga}} + 1$
	множество, не перекрывающих друг друга лунок сферической формы	Электроэрозионная обработка	$K_{S4} = \frac{\pi}{2 \cdot (1 + \sin a)} + 1 - \frac{\pi}{4}$	$K_{V4} = \frac{\pi}{24} \cdot (1 - \sin a) \times [3 + (1 - \sin a)^2] + 1$

В третьей главе описаны методики, материалы, образцы и оборудование, использованные в экспериментальных исследованиях.

На основании анализа результатов теоретических исследований, а также с учетом конструктивных особенностей заготовок распиловочных дисков (малая толщина и жесткость) для подготовки поверхности были приняты два способа обработки. В частности, это обработка абразивным лепестковым кругом и виброударная обработка свободным абразивом, технологические схемы которых представлены на рисунке 4. Шаржирование боковых поверхностей трех видов заготовок дисков (в исходном состоянии и обработанных принятыми способами) проводилось с использованием ранее созданной на кафедре «Конструирование и производство приборов» установке для их двухстороннего шаржирования с ультразвуком при неизменных (оптимальных) режимах обработки. Использовалась алмазная суспензия, состоящая из одной весовой части алмазного порошка АСН 20/14 и трех весовых частей касторового масла.



а – абразивным лепестковым кругом, б – виброударной обработкой свободным абразивом  
 1 – заготовка диска, 2 – планшайба, 3 – абразивный лепестковый круг, 4 – деформирующие инструменты, 5 – синхронно вращающиеся валы, 6 – корпуса, 7 – плоские пружины подвески корпусов, 8 – пружина, создающая предварительное сжатие, 9 – вращающийся кулачок

**Рисунок 4 – Технологические схемы обработки заготовок дисков**

Для определения характеристик алмазосодержащего покрытия, сформированного на поверхности диска, а также эксплуатационных показателей получаемых инструментов были использованы апробированные методики, устройства и средства измерений. Так абразивная способность и износостойкость покрытия оценивались по величине линейного износа цилиндрического образца диаметром 3 мм из кварцевого стекла (К8), истираемого при постоянном усилии его прижатия к боковой поверхности вращающегося с постоянной частотой распиловочного диска. Режущая способность и стойкость инструментов оценивались по значению интенсивности распиливания ( $\text{мм}^2/\text{мин}$ ) ими образцов из корунда (9 единиц твердости по шкале Мооса) квадратного сечения (4x4 мм). Испытания проводились с использованием промышленной распиловочной секции станка модели ШП-2 с обеспечением постоянного усилия прижатия образца к инструменту.

Для измерения параметров шероховатости боковых поверхностей заготовок дисков, а также распиленной поверхности корундовых образцов использовался профилометр-профилограф Taylor Hobson. Толщина, как заготовок, так и полученных инструментов измерялась с помощью вертикального длинномера ИЗВ-6 с точностью до 0,1 мкм.

На основе разработанной для экспериментальных исследований методики по выражению неопределенностей были определены бюджет, суммарная и расширенная неопределенности.

В четвертой главе на основе результатов экспериментальных исследований разработана технология подготовки микрорельефа поверхности заготовок

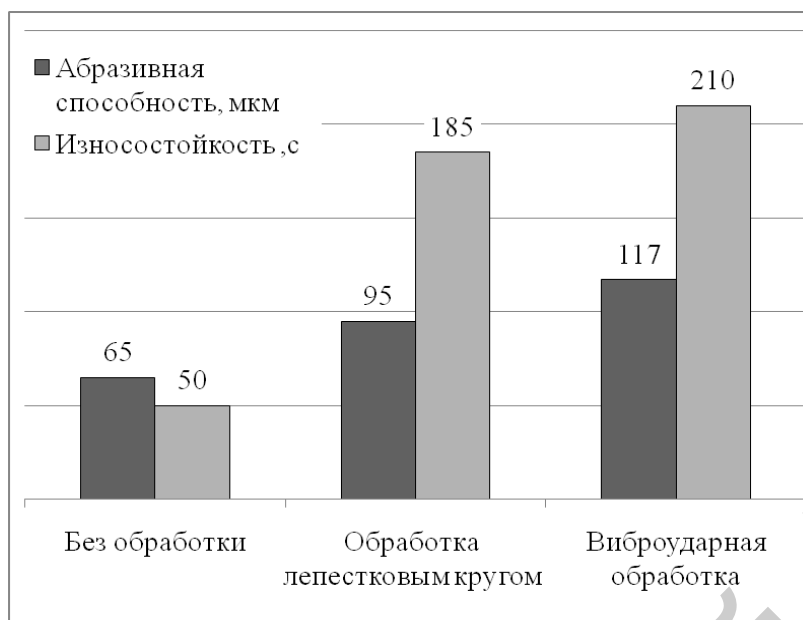
распиловочных дисков, шаржированных с ультразвуком.

Установлено, что при обработке поверхности абразивным лепестковым кругом на ней формируется микрорельеф в виде множества рисок, направление которых определяется соотношением частоты вращения заготовки  $n_3$  и круга  $n_{кр}$  (значение последней в экспериментах было постоянным и равным  $100 \text{ мин}^{-1}$ ). Получены экспериментальные зависимости изменения параметра  $Rz$  шероховатости обработанной поверхности и толщины заготовки от частоты её вращения и зернистости используемого лепесткового круга. На основе их анализа обоснованы режимы обработки, включая рациональный диапазон изменения частоты вращения заготовки, зернистости абразивных кругов и продолжительности обработки одной стороны заготовки, при которых обеспечиваются благоприятные для протекания процесса шаржирования вид микрорельефа и его высотные параметры.

Установлено, что в результате виброударной обработки заготовок дисков свободным абразивом на их боковых поверхностях формируется микрорельеф в виде множества лунок, параметры которых определяются условиями и режимами выполнения операции. Получены экспериментальные зависимости изменения параметра  $Rz$  шероховатости обработанной поверхности и толщины заготовки от частоты колебаний деформирующих инструментов при постоянной частоте их синхронного вращения ( $180 \text{ мин}^{-1}$ ), и зернистости абразивного материала (электрокорунд белый F80, F100, F150). На основании анализа результатов исследований обоснованы режимы виброударной обработки, включая рациональный диапазон изменения частоты колебаний деформирующих инструментов (5–10 Гц), зернистости абразива (F100) и продолжительности двухсторонней обработки заготовок (30 с), при которых на их поверхностях формируется благоприятный для протекания процесса шаржирования вид микрорельефа с необходимыми высотными параметрами.

На основе полученных экспериментальных данных, отражающих влияние способа и принятых условий обработки поверхностей заготовок на абразивную способность и износостойкость формируемого на них алмазосодержащего покрытия, установлены режимы, обеспечивающие наибольшие значения этих показателей. Так обработку абразивным лепестковым кругом следует выполнять с использованием круга P120, при частоте его вращения  $100 \text{ мин}^{-1}$ , величине натяга 3 мм, частоте вращения заготовки  $1000 \text{ мин}^{-1}$  и с продолжительностью обработки одной стороны заготовки 30 с. Виброударную обработку следует проводить с частотой колебаний деформирующих инструментов 7,5 Гц и амплитудой 2 мм, при статическом усилии их сжатия 40 Н, и с частотой синхронного вращения  $180 \text{ мин}^{-1}$ ; использовать в качестве абразива электрокорунд белый с размером зерна 100 мкм при продолжительности двухсторонней обработки, равной 30 с. На рисунке 5 представлены результаты экспериментальных исследований абразивной способности и износостойкости алмазосодержащего покрытия, полученного на распиловочных дисках при обработке их заготовок принятыми способами на оптимальных режимах. Анализ результатов показывает, что введение в технологический процесс изготовления распиловочных

дисков операции по целенаправленной подготовке микрорельефа поверхности исходных заготовок позволяет повысить как абразивную способность, так и износостойкость сформированного на них алмазосодержащего покрытия по сравнению с полученным по традиционной технологии. Так за счет обработки заготовок абразивным лепестковым кругом абразивная способность и износостойкость покрытия, соответственно, выросли в 1,5 и 3,7 раза, а использование виброударной обработки привело к увеличению этих показателей в 1,8 и 4,2 раза. Следовательно, такое покрытие по сравнению с традиционно полученным, характеризуется большим количеством (концентрацией) закрепленных в нем алмазных зерен, что подтверждается его более высокой абразивной способностью. При этом прочность их закрепления в этом покрытии оказывается выше, о чем свидетельствует его более высокая износостойкость.



**Рисунок 5 – Значения абразивной способности и износостойкости алмазосодержащего покрытия, полученного на поверхности исследуемых распиловочных дисков**

На основании результатов экспериментальных исследований по распиливанию образцов из корунда тремя видами испытываемых инструментов получены сравнительные данные об их эксплуатационных показателях, значения которых представлены в таблице 2 (параметр  $\gamma$  характеризует уровень устойчивости к деформации продольного изгиба).

Распиловочные диски, изготовленные с предварительной подготовкой поверхности исходных заготовок, по интенсивности распиливания образцов из корунда, стойкости и уровню устойчивости к деформациям продольного изгиба существенно превосходят по аналогичным показателям инструменты, полученные по традиционной технологии. Единственно, они незначительно уступают последним по качеству распиленной поверхности образца, хотя увеличение параметра Ra на 0,05 мкм с практической точки зрения не существенно.

Таблица 2 – Результаты исследований эксплуатационных показателей трех видов испытуемых распиловочных дисков

Технология изготовления дисков	Интенсивность распиливания (мм <sup>2</sup> /мин)	Стойкость дисков (мин)	Параметр шероховатости распиленной поверхности, Ra, (мкм)	Отношение критической нагрузки к критической деформации диска, $\gamma = P_{\text{крит}} / \delta_{\text{крит}}$ (Н/мм).
Традиционная	<b>0,86</b>	<b>16</b>	<b>0,24</b>	<b>1000</b>
С обработкой заготовок лепестковым кругом	<b>1,14</b>	<b>25</b>	<b>0,27</b>	<b>1155</b>
С виброударной обработкой заготовок свободным абразивом	<b>1,68</b>	<b>32</b>	<b>0,29</b>	<b>1183</b>

На основе анализа полученных результатов экспериментальных исследований разработана технология изготовления распиловочных дисков, предусматривающая дополнительную (перед шаржированием) операцию виброударной двухсторонней обработки их заготовок свободным абразивом. По сравнению с традиционной технологией она обеспечивает наибольшее повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков. В частности, по интенсивности распиливания образцов из корунда в 2 раза, по стойкости в 2 раза, по уровню устойчивости к деформации продольного изгиба в 1,2 раза, при практически таком же качестве распиленной поверхности образца.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. На основании анализа результатов экспериментальных исследований строения алмазосодержащего покрытия, установлено, что оно является однослойным, состоящим из твердой пленки, образовавшейся в результате высыхания касторового масла, и алмазных зерен, которые в зависимости от наличия и прочности связи с металлической поверхностью диска имеют в покрытии различную степень закрепления. Исходя из этого, установлены положительные эффекты, связанные с подготовкой микрорельефа поверхности заготовки диска, позволяющие повысить прочностные характеристики алмазосодержащего покрытия, в частности, за счет ограничения в процессе ее шаржирования явления перекачивания алмазных зерен в зоне обработки;



снижения усилия их внедрения в материал диска при одновременном повышении прочности закрепления и увеличения прочности сцепления твердой пленки с металлической поверхностью заготовки [3].

2. На основании результатов математического моделирования процесса перекатывания алмазного зерна между поверхностями деформирующего инструмента и заготовки диска, учитывающего влияние ее микрорельефа, получена зависимость, позволяющая рассчитать его параметры (минимальная высота микронеровностей  $Rz \min$  и угол раскрытия впадин  $2\alpha$ ), при которых перекатывание алмазного зерна размера ( $a$ ) в зоне обработки будет отсутствовать. В частности, установлено, что при  $2\alpha = 130^\circ$  это условие выполняется при  $Rz \min/a = 0,11$ [4].

3. На основании результатов исследований по влиянию вида жидкой составляющей алмазной суспензии и геометрических параметров характерных видов микрорельефа на условия контактирования суспензии с поверхностью распиловочного диска по критериям наибольшей удельной площади и емкости микрорельефа, а также прочности сцепления твердой пленки, установлено, что в сравнении с гладкой поверхностью наибольшей удельной площадью контакта и емкостью при взаимодействии с жидкой составляющей алмазной суспензии обладает микрорельеф в виде совокупности лунок конической формы (виброударная обработка свободным абразивом), а также доказано, что традиционно применяемое касторовое масло в сравнении с другими исследованными обеспечивает наибольшую прочность сцепления образовавшейся в результате его высыхания твердой пленки с поверхностью диска. [3, 5, 11].

4. На основании результатов экспериментальных исследований влияния вида и параметров микрорельефа подготовленной поверхности заготовки диска на абразивную способность и износостойкость получаемого на ней алмазосодержащего покрытия установлено, что после ее обработки лепестковым кругом на оптимальных режимах значения этих показателей, соответственно, возросли в 1,5 и 3,7 раза, а после их виброударной обработки свободным абразивом – в 1,8 и 4,2 раза по сравнению с покрытием, полученным без подготовки поверхности заготовки, что объясняется повышением в процессе шаржирования степени насыщения поверхности алмазными зернами (частицами) и прочности закрепления в ней [1, 2, 6, 7].

5. На основании результатов экспериментальных исследований по влиянию режимов обработки лепестковым кругом и виброударной обработки свободным абразивом заготовок распиловочных дисков на их режущую способность, стойкость (при обработке образцов из корунда), уровень устойчивости к деформации продольного изгиба установлен оптимальный способ и режимы обработки, обеспечивающие наибольшее повышение этих

показателей по сравнению с инструментом, изготовленным по традиционной технологии. Это виброударная обработка, выполняемая при частоте колебаний деформирующих инструментов 7–8 Гц с амплитудой  $2 \pm 0,1$  мм, при частоте их синхронного вращения 170–190 мин<sup>-1</sup> и статическом усилии сжатия 40–45 Н (при диаметре деформирующих инструментов 20 мм), с применением электрокорунда белого марки F100 и при продолжительности двухсторонней обработки 30–35 с. Она обеспечивает получение распиловочных дисков, которые по сравнению с изготовленными по традиционной технологии превосходят их по режущей способности в 2 раза, по стойкости в 2 раза, по уровню устойчивости к деформации продольного изгиба в 1,2 раза при незначительном (на 0,05 мкм) увеличении высоты микронеровностей на распиленной поверхности корундового образца [6, 8, 9, 10].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанная технология изготовления распиловочных дисков с использованием виброударной обработки свободным абразивом исходной поверхности заготовок, позволяющая существенно повысить эксплуатационные показатели получаемых инструментов, может быть использована в алмазообрабатывающем производстве. В результате производственных испытаний опытной партии распиловочных дисков, проведенных в ЗАО «Белгран», было установлено, что распиловочные диски, полученные с применением разработанной технологии, превосходят диски Смоленского ООО «Алмаз Сервис» по следующим показателям: по расходу дисков на 1 кар сырья на 7 %, по интенсивности распиливания на 4,2 %, распиленные полуфабрикаты имеют высокое качество обработанных поверхностей, вследствие чего выход годного повысился на 0,25 %. Экономический эффект составил 14400 бел. рублей на диск в ценах 2009 года.

2. Разработанная технология виброударной обработки заготовок распиловочных дисков свободным абразивом (АТЮФ 056.000) может быть использована предприятиями, занимающимися производством распиловочных дисков.

3. Результаты исследований, включая данные по вопросу совершенствования технологии формирования алмазосодержащих покрытий на поверхности инструментов, внедрены в учебный процесс подготовки инженерных кадров по специальности 1-52.02.01 «Технология и оборудование ювелирного производства».

## Список публикаций по теме диссертации

### *Статьи в научных журналах*

1. Киселев, М.Г. Повышение качества шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков путем их предварительной виброударной обработки / М.Г. Киселев, П.О. Корзун // Вестник БНТУ. – 2007. – № 5. – С. 24–29.
2. Киселев, М.Г. Определение технологических показателей процесса обработки боковых поверхностей распиловочных дисков лепестковыми кругами / М.Г. Киселев, Дроздов А.В., П.О. Корзун // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2008. – № 2. – С. 39–47.
3. Киселев, М.Г. Экспериментальная оценка влияния различных масел, входящих в состав алмазной суспензии, на адгезию получаемого алмазосодержащего покрытия к поверхности распиловочного диска / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, П.О. Корзун, В.А. Лётыч // Вестник БНТУ. – 2009. – № 2. – С. 35–42
4. Киселев, М.Г. Теоретическая оценка влияния параметров шероховатости поверхности распиловочных дисков на подвижность алмазных зерен в процессе их шаржирования / М.Г. Киселев, П.О. Корзун // Вестник ПГУ. – 2009. – № 5. – С. 118–123
5. Киселев, М.Г. Определение вида микрорельефа обработанной поверхности, обеспечивающего ее наибольшую площадь и объем при контактировании с жидкостью / М.Г. Киселев, П.О. Корзун // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2009. – № 4. – С. 40–52.
6. Киселев М.Г. Повышение режущей способности распиловочных дисков абразивной обработкой боковых поверхностей при формировании на них алмазосодержащего покрытия / М.Г. Киселев, П.О. Корзун // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2009. – Т.14, № 4. – С. 101–106

### *Материалы конференций*

7. Киселев, М.Г. Повышение качества шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков путем их предварительной абразивной обработки / М.Г. Киселев, П.О. Корзун // Сборник научных трудов VI международной научно-технической конференции «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин» в 3-х томах. Т. II – Новополцк: УО «ПГУ», 2007. – С. 115–119.
8. Корзун, П.О. Способ виброударной обработки боковых поверхностей распиловочных дисков и установка для его реализации / П.О. Корзун, Ю.А. Савич // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления: материалы VIII международной межвузовской конференции студентов, магистрантов и аспирантов. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2008 – С.103–106.

9. Киселев, М.Г. Установка для виброударной обработки боковых поверхностей распиловочных дисков / М.Г. Киселев, П.О. Корзун, А.В. Дроздов // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка. Материалы докладов 8-й Международной научно-технической конференции. – Минск: ГНУ «Институт порошковой металлургии», 2008. – С. 93 – 94.

10. Киселев, М.Г. Повышение качества шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков на основе совершенствования технологии их шаржирования / М.Г. Киселев, П.О. Корзун, С.С. Савицкий, В.А. Летыч // Наука – образованию, производству, экономике. Материалы седьмой научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2009 – С.443.

11. Киселев, М.Г. Определение оптимального микрорельефа поверхности, обеспечивающего ее наибольшую удельную площадь, маслостойкость и поверхностную энергию / М.Г. Киселев, П.О. Корзун, Т.П. Павич // Наука - образованию, производству, экономике. Материалы седьмой научно-технической конференции. – Минск: БНТУ, 2009 – С. 444.

Тэхналогія падрыхтоўкі мікрарэльефа паверхні загатовак  
распіловачных дыскаў, шаржыраваных з ультрагукам

Ключавыя словы: распіловачны дыск, алмазязмяшчальнае пакрыццё, падрыхтоўка паверхні, паверхневая апрацоўка, шаржыраванне

Мэтай работы з'яўляецца тэарэтычнае і тэхналагічнае забеспячэнне павышэння эксплуатацыйных паказчыкаў распіловачных дыскаў, уключаючы іх рэжучую здольнасць, устойлівасць, якасць распіленых паверхняў, устойлівасць да дэфармацыі падоўжнага выгіну шляхам удасканалення тэхналогіі фарміравання на іх алмазязмяшчальнага пакрыцця метадам шаржыравання з падрыхтоўкай паверхні зыходных заготовак.

Тэарэтычная частка работы выканана на падставе палажэнняў тэорыі абразіўнага зношвання матэрыялаў, тэарэтычнай механікі, тэорыі ваганняў, тэорыі пластычнасці, матэматычнага аналізу і аналітычнай геаметрыі. Лікавыя даследванні праводзіліся з выкарыстаннем сучаснай вылічальнай тэхнікі і праграмнага забеспячэння. Падчас выканання эксперыментальных даследванняў выкарыстоўвалася тэхналагічнае абсталяванне, аснастка і інструмент, што ўжываліся для апрацоўкі монакрышталяў алмазу. Таксама ўжываліся спецыяльна створаныя эксперыментальныя ўстаноўкі і прыстасаванні.

Распрацаваны і даследваны матэматычныя і геаметрычныя мадэлі працэсаў, што працякаюць пры фарміраванні алмазязмяшчальнага пакрыцця на мадыфікаванай паверхні загатоўкі дыска, адказных за яго трываласныя характарыстыкі. На іх падставе абгрунтаваны рацыянальныя спосабы апрацоўкі зыходных заготовак дыскаў, тэхналагічныя паказчыкі якіх дазваляюць атрымоўваць на іх паверхнях характэрны выгляд мікрарэльефа з вызначанымі яго характарыстыкамі. Распрацавана метадыка правядзення эксперыментальных даследванняў па адзнаке ўплыву выкарыстаных спосабаў і рэжымаў апрацоўкі заготовак дыскаў на абразіўную здольнасць і зносастойкасць алмазязмяшчальнага пакрыцця, якое атрымліваецца на іх, а таксама на эксплуатацыйныя паказчыкі распіловачных дыскаў, якія выраблены па такой тэхналогіі. Праведзены эксперыментальныя даследванні, у выніку якіх былі вызначаны аптымальны спосаб і рэжымы паверхневой апрацоўкі заготовак дыскаў, якія забяспечваюць найбольшае павелічэнне ўзроўню эксплуатацыйных паказчыкаў атрыманых інструментаў у параўнанні з выкананымі па традыцыйнай тэхналогіі.

Вынікі работы могуць быць вакарыстаны ў алмазаапрацоўваючай вытворчасці.

Технология подготовки микрорельефа поверхности заготовок  
распиловочных дисков, шаржированных с ультразвуком

Ключевые слова: распиловочный диск, алмазосодержащее покрытие, подготовка поверхности, поверхностная обработка, шаржирование

Целью работы является теоретическое и технологическое обеспечение повышения эксплуатационных показателей распиловочных дисков, включая их режущую способность, стойкость, качество распиленных поверхностей, уровень устойчивости к деформации продольного изгиба путем совершенствования технологии формирования на них алмазосодержащего покрытия методом шаржирования с подготовкой поверхности исходных заготовок.

Теоретическая часть работы выполнена на основе положений теории абразивного изнашивания материалов, теоретической механики, теории колебаний, теории пластичности, математического анализа и аналитической геометрии. Численные исследования проводились с использованием современной вычислительной техники и программного обеспечения. В ходе выполнения экспериментальных исследований использовалось технологическое оборудование, оснастка и инструмент, применяемые для обработки монокристаллов алмаза. Также применялись специально созданные экспериментальные установки и приспособления.

Разработаны и исследованы математическая и геометрическая модели процессов, протекающих при формировании алмазосодержащего покрытия на подготовленной поверхности заготовки диска, ответственных за его прочностные характеристики. На их основе обоснованы рациональные способы обработки исходных заготовок дисков, технологические показатели которых позволяют получать на их поверхностях характерный вид микрорельефа с определенными его параметрами. Разработана методика проведения экспериментальных исследований по оценке влияния примененных способов и режимов обработки заготовок дисков на абразивную способность и износостойкость получаемого на них алмазосодержащего покрытия, а также на эксплуатационные показатели изготовленных по такой технологии распиловочных дисков. Проведены экспериментальные исследования, в результате которых были определены оптимальный способ и режимы поверхностной обработки заготовок дисков, обеспечивающие наибольшее повышение уровня эксплуатационных показателей полученных инструментов в сравнении с изготовленными по традиционной технологии.

Результаты работы могут быть использованы в алмазообрабатывающем производстве.

SUMMARY  
Pavel Korzoun

Technology of preparation micro relief of surfaces of the stocking up  
sawing disk, charging with ultrasound

Key words: sawing blade, diamond-bearing covering, surface modification, surface treatment, charging

The aim of the work is theoretical and experimental ensuring of increasing sawing discs operating characteristics including their cutting ability, wear resistance, quality of sawn surfaces, level of steadiness to deformation of lengthwise bend by the way perfection technology of the shaping on it diamond-bearing coating by the modification of surface of the stocking up method.

Theoretical part of the work is implemented on the basis of using fundamental theses of the abrasive wear-out, of mechanical engineering, theory of oscillations, theory of plasticity, mathematical analysis and analytic geometry. Numerical studies were performed with the use of modern applied programs and computing means. Industrial equipment and tools for ultra-hard monocrystals sawing were used during execution of experimental investigations. Specially designed devices and tools were used during fulfillment of some experiments.

It is designed and explored mathematical, physical and geometric models of the processes, running when shaping diamond-bearing coating on modified surfaces of the stocking up the disk and responsible for his strengthening characteristics. On their base are motivated rational ways of the processing the source stocking up disk, which technological factors allow to get on their surface typical type micro relief with determined its parameter. The designed methods of the undertaking the experimental studies on estimation influence applying ways and mode of the processing the stocking up disk on abrasive ability and wear capability got on them diamond-bearing covering, as well as on working factors made on such technologies sawing disk.

The results of the work can be used in diamond-processing industry.

Научное издание

КОРЗУН  
Павел Олегович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ  
ЗАГОТОВОК РАСПИЛОВОЧНЫХ ДИСКОВ, ШАРЖИРОВАННЫХ  
С УЛЬТРАЗВУКОМ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.03.01 – Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки

---

Подписано в печать 24.03.2010.  
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.  
Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00 Тираж 60. Заказ 288.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Белорусский национальный технический университет.  
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009  
Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.