

На правах рукописи



Коротков Виталий Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ СТАЛЕЙ ПУТЁМ  
СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ С ЗА-  
ДАННОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН**

Специальность

2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

доктора технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

**Научный** **Григорьев Сергей Николаевич**

**руководитель:** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

**Официальные** **Носенко Владимир Андреевич**

**оппоненты:** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств» Волжского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский

**Грубый Сергей Витальевич**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Инструментальная техника и технологии» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

**Янюшкин Александр Сергеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова», г. Чебоксары

**Ведущая**

**организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита состоится 25 декабря 2025 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/korotkov-vitaliy-aleksandrovich/index.php>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации.

Эффективность процесса шлифования во многом предопределяется работоспособностью абразивных инструментов и уровнем их эксплуатационных возможностей. Анализ результативности применения этих инструментов показывает, что, несмотря на их широкое распространение, их потенциальные возможности используются частично. В число основных причин, обуславливающих этот недостаток, входят произвольность формы и хаотичность расположения абразивных зёрен в теле данных инструментов. Основная масса зёрен имеет произвольную форму, изменяющуюся в широком диапазоне от изометрических до пластинчатых разновидностей. Такой разброс формы зёрен обусловлен спецификой типовых технологий их изготовления, основанных на дроблении в конечной стадии абразивных слитков и последующем рассеивании абразивных частиц по размерам. При этом форма зёрен остаётся практически бесконтрольной и неуправляемой. Поэтому лишь относительно небольшая группа зёрен на рабочей поверхности инструмента принимает активное участие в процессе резания, имея для этого благоприятную геометрию своих режущих частей, которая непосредственно связана с формой зёрен.

Наряду с формой, другим фактором, активно влияющим на геометрию и эффективность работы зёрен, является их ориентация в теле инструмента. Это наглядно подтверждается на примере применения шлифовальных шкур и лент, изготовленных с использованием электростатического эффекта, позволяющего ориентировать зёрна острыми выступами перпендикулярно к основе этих инструментов. Для других разновидностей абразивных инструментов положительный промышленный опыт их создания с применением управления ориентацией зёрен практически не известен. Отсутствуют также технологии производства абразивных инструментов, в которых учитывались и целенаправленно упорядочивались бы одновременно форма и ориентация зёрен. Неупорядоченная форма и произвольная ориентация зёрен, кроме ухудшения условий и результатов их участия в процессе резания, служат также источником возможного возникновения дефектов внутреннего строения композиционного материала абразивных инструментов, что также снижает их эксплуатационные показатели (разрывную прочность, допустимую скорость шлифования и др.).

В связи с изложенным представляется актуальной проблема создания и применения новых отечественных абразивных инструментов из зёрен с заданной формой и ориентацией, которые бы реализовывали концепцию максимального использования режущих возможностей каждого отдельного зерна и упорядочения внутреннего строения абразивного композита, что обеспечивает повышение эксплуатационных возможностей таких инструментов по сравнению с существующими аналогами.

Актуальность данной темы подтверждается выигранным грантом по федеральной программе «Старт-06» «Новое поколение шлифовальных инструментов на основе зёрен с заданной ориентацией и контролируемой формой», грантом Губернатора Кемеровской области для поддержки молодых учёных «МК-2010», выигранным конкурсом «Ты – можешь!» (средства специального фонда Президента Российской Федерации), участием в выполнении финансируемого государственного контракта «Повышение ресурса отечественных деталей машин на основе совершенствования процессов механической обработки, создания новых инструментов, оптимизации технологических процессов и раскрытия закономерностей технологического наследования состояния поверхностного слоя деталей на стадиях жизненного цикла» (№ гос. рег. 7.2398.2011), руководством по выигранному гранту «УМНИК – 2015» «Проектирование приборов и аппаратных комплексов для ре-

ализации технологии производства новых конструкций шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен».

**Степень разработанности.** Изучению физико-механических и режущих свойств абразивных и алмазных инструментов и их компонентов посвящены работы Абидова Р.А., Байкалова А.К., Бакуля В.Н., Бокучавы Г.В., Братана С.М., Ваксера Д.Б., Васильева Н.Н., Волского Н.И., Глейзера Л.А., Димова Ю.В., Евсеева Д.Г., Зайцева А.Г., Ивановой Т.Н., Ильичёва Л.Л., Ипполитова Г.М., Карпова А.Б., Кольцова В.П., Короткова А.Н., Корчака С.Н., Кремня З.И., Кудасова Г.Ф., Кудряшова Б.П., Кулакова Д.М., Курдюкова В.И., Лурье Г.Б., Лубомудрова В.Н., Маслова Е.Н., Мишнаевского Л.Л., Новосёлова Ю.К., Носенко В.А., Полтавец В.В., Полянчикова Ю.Н., Попова С.А., Резникова А.Н., Сальникова А.Н., Саютина Г.И., Силина С.С., Старкова В.К., Филимонова Л.Н., Худобина Л.В., Шумячера В.М., Якимова А.В., Янюшкина А.С., Ящерицына П.И., Denger W., Drössler H., Leonesio M., Malkin, S., Opitz H., Peklenik J., Shaw M.C., Yoshikawa H. и других отечественных и зарубежных учёных. В работах названных авторов исследована взаимосвязь физико-механических показателей абразивных материалов, зернистости, типов связки, твёрдости, структуры, с эксплуатационными показателями шлифовальных инструментов. В частности, все исследования указывают на специфику процесса шлифования, который является результатом группового микрорезания множеством отдельных зёрен. Эффективность такого процесса зависит от результатов работы каждого единичного зерна. Это обстоятельство выдвигает на первый план роль и значимость зёрен, как режущих элементов, от которых в первую очередь зависят эксплуатационные возможности шлифовальных инструментов. Показано, что в число главных условий эффективной работы зёрен входит обладание ими благоприятной, для конкретного случая обработки, геометрией, которая определяется формой и ориентацией зёрен в теле инструмента. Известны исследования и технологии, в которых отдельно упорядочивается форма, либо ориентация зёрен: круги из сферо- и формокорундов, из овализованных зёрен, шлифовальные шкурки и ленты с электростатической ориентацией зёрен, технологии ускоренного охлаждения расплава электрокорунда, способствующие получению зёрен игольчато-пластинчатых форм и др. При этом, подбор рациональной формы, или направления ориентации зёрен для конкретных типов шлифовальных инструментов под конкретные режимы резания и обработки материала в большинстве случаев либо вообще не производится, либо осуществляется опытным путём без привлечения теоретических разработок. Недостаточно исследованы и разработаны также вопросы проектирования, создания и применения абразивных инструментов, в которых бы одновременно упорядочивались форма и ориентация зёрен.

**Цель работы** – повышение эффективности шлифования путём создания и применения абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен, обладающего повышенными эксплуатационными возможностями за счёт упорядочения внутреннего строения и управляемой геометрии режущих элементов.

Для достижения поставленной цели выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, при проведении которых сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка методологии создания абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен.

2. Определение эффективного способа разделения зёрен по форме из исходной абразивной массы, разработка способов, устройств и программного обеспечения для оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве, для определения площади их поверхности, величин передних углов, напряжений и прочности, количества зёрен в единице объёма и особенностей их износа.

3. Проведение комплексных лабораторных испытаний зёрен с учётом их формы и ориентации, установление и математическое описание взаимосвязи формы зёрен, а также формы и ориентации зёрен с развитостью и размером площади их поверхности, количеством в единице объёма, величиной передних углов, напряжениями, прочностью и стойкостью зёрен.

4. Разработка способов, оборудования и оснастки для изготовления и испытания шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен.

5. Изготовление и проведение комплексных лабораторных испытаний шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен, установление и математическое описание взаимосвязи формы и ориентации зёрен в шлифовальных кругах с показателями их режущей способности, коэффициентом шлифования, мощностью и температурой резания, изменениями структуры металла заготовок и шероховатостью поверхностей после шлифования.

6. Разработка на основе полученных зависимостей и моделей рекомендаций по прогнозированию и управлению эксплуатационными показателями шлифовальных инструментов под приоритетные задачи различных операций шлифования посредством регулирования формы и ориентации зёрен.

7. Производственные испытания и внедрение новых абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен на промышленных предприятиях.

**Объектом исследований** являются шлифовальные круги из зёрен с заданной формой и упорядоченной ориентацией в теле инструмента.

**Предметом исследований является** установление зависимостей влияния формы и ориентации зёрен на их геометрические, прочностные и стойкостные показатели, а также на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов и качество обрабатываемых ими поверхностей.

**Научная новизна работы** состоит:

1. В разработанной методологии создания абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен, базирующейся на учёте влияния и научно обоснованном выборе этих параметров, позволяющей упорядочивать внутреннее строение такого инструмента и управлять геометрией его зёрен, что обеспечивает повышение эксплуатационных возможностей инструментов и эффективности процесса шлифования.

2. В установлении и математическом описании:

– взаимосвязи формы зёрен с развитостью и размером площади их поверхности, а также с количеством зёрен в единице объёма;

– совместного влияния формы и ориентации зёрен на величины их передних углов, на напряжения, возникающие в зёрнах при работе, а также на прочность и стойкость зёрен;

– влияния формы и ориентации зёрен на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов: режущую способность, коэффициент шлифования, мощность и температуру резания;

– влияния формы и ориентации зёрен на качество шлифуемых поверхностей: микротвёрдость и микроструктуру поверхностного слоя и шероховатость обрабатываемых поверхностей.

**Практическая ценность работы** заключается в:

1. Разработке технологий и технологической оснастки для изготовления шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен (патенты РФ на способы № 2349446, № 2369474).

2. Разработке способа испытания шлифовальных кругов на механическую прочность (патент РФ № 2292032).

3. Разработке способов и программного продукта для оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве, площади поверхности зёрен и их количества в единице объёма, передних углов и напряжений в зёрнах с учётом их формы, ориентации, условий обработки и параметров силового нагружения, для оценки стойкости и характера износа зёрен с контролируемой формой и ориентацией, для оценки эффективности ориентирования зёрен в инструментах (свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2006613051, № 2007612468, № 2008610817, № 2008614244, № 2011614263, № 2011615114, № 2011616506, № 2015619877, № 2017663831).

4. Разработке стендов, установок и приспособлений для изучения характеристик зёрен и проведения комплексных испытаний новых конструкций кругов на прочность, режущую способность, износ, мощность резания.

5. Создании и комплексных испытаниях шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен.

6. Разработке рекомендаций по изготовлению и рациональному применению шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен.

7. Предпроектном освоении производства новых абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен и внедрении их на заводах машиностроительного профиля и предприятиях других отраслей.

**Теоретическая значимость работы.** Установлены, теоретически обоснованы и математически описаны взаимосвязи параметров формы и ориентации зёрен с эксплуатационными характеристиками самих зёрен и изготавливаемых из них шлифовальных инструментов. Это позволяет прогнозировать и обоснованно управлять работоспособностью шлифовальных инструментов за счёт регулирования параметров формы и ориентации зёрен при изготовлении инструментов с учётом заданных требований к операциям шлифования.

**Методология, методы и средства исследования.**

Работа выполнена на базе теории шлифования материалов, основ проектирования абразивного инструмента с привлечением теории прочности хрупких тел, прочности вращающихся объектов, метода конечных элементов, теории вибрационного сепарирования частиц, методов математического моделирования, статистической обработки и корреляционно-регрессионного анализа результатов испытаний с широким использованием ЭВМ, на основе прикладных программ «Excel» и «Statistica», графических редакторов «Компас» и «Paint», программного комплекса «SolidWorks», а также специально разработанного и зарегистрированного программного продукта в составе 9 программ для ЭВМ.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием современных контрольно-измерительных средств и приборов в лабораториях технических университетов и в производственных условиях машиностроительных и инструментальных заводов в России и за рубежом. Методика испытаний инструментов отработана в рамках международной программы сотрудничества с Техническим университетом г. Кемнитц и в лабораториях завода по производству шлифовальных инструментов «Rottluff» (Германия).

**Результаты, полученные автором и выносимые на защиту.**

1. Методология создания абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен.

2. Технологии изготовления шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен (патенты РФ на способы изготовления шлифовальных инструментов № 2349446, № 2369474).

3. Способы и программное обеспечение для оценки геометрических, прочностных и стойкостных характеристик зёрен (свидетельства о госрегистрации программ для ЭВМ № 2006613051, № 2007612468, № 2008610817, № 2008614244, № 2011614263, № 2011615114, № 2011616506, № 2015619877, № 2017663831).

4. Установленные зависимости параметров формы и ориентации зёрен с геометрическими, прочностными и стойкостными показателями зёрен и с эксплуатационными показателями шлифовальных кругов, которые позволяют прогнозировать и целенаправленно управлять работоспособностью шлифовальных инструментов с учётом требований к их стойкости и режущей способности, а также к качеству обрабатываемых поверхностей.

5. Рекомендации по рациональному применению шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен.

#### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Работа соответствует специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» (технические науки) пп. 3 и 4 направлений исследований паспорта специальности:

– «Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки»;

– «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки».

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается сходимостью данных проведения многочисленных дублирующих экспериментов, итогами лабораторных и производственных испытаний и внедрением созданных разработок на ряде промышленных предприятий. Адекватность разработанных математических моделей подтверждается их проверкой по коэффициентам корреляции  $R^2$ , критерию Фишера и другим известным оценочным критериям.

#### **Производственное внедрение.**

Новый абразивный инструмент и другие разработанные технические прошли проверку и доказали эффективность при испытаниях и внедрении в производственных условиях на ООО ИК «Спецкомплектация» (г. Кемерово), ООО «Завод электротехнической аппаратуры» (г. Кемерово), ООО «Восток-ПолимерХим» (г. Кемерово), авторемонтных мастерских компании «Кузбассразрезуголь» (г. Белово), ООО «Агромаш» (г. Кемерово).

#### **Апробация работы**

Основные положения работы доложены на 20-ти международных и 25-и всероссийских конференциях: в т.ч. в г. Кемерово (в 2007, 2009, 2010–2013, 2016, 2017, 2021, 2023 гг.), г. Комсомольске-на-Амуре (2015 г.), г. Томске (2003, 2005–2007, 2013 гг.), г. Москве (2019 г.), г. Новосибирске (2010–2013, 2016, 2017 гг.), г. Севастополе (2015 г.), г. Тюмени (2005 г.), г. Юрге (2004, 2005, 2007 гг.), г. Ульяновске (2003 г.). Шлифовальные круги с контролируемой геометрией зёрен

экспонировались на специализированных выставках-ярмарках «Предпринимательство» и «Инновационная экономика» (г. Кемерово, 2007 г., 2010 г.), где были удостоены дипломов. Результаты работы обсуждались также на научных семинарах в Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН» на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» в 2016–2025 гг., в Севастопольском государственном университете на кафедре «Технология машиностроения» в 2015 г., в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете на кафедре «Технология машиностроения» в 2015 г., в Национальном исследовательском Томском политехническом университете на кафедре «Технология автоматизированного машиностроительного производства» в период с 2003 по 2015 гг., в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН в 2015 г., в Национальном исследовательском Иркутском государственном техническом университете на кафедре «Оборудование и автоматизация машиностроения» в 2008 и 2014 гг. Отдельные фрагменты работы заслушаны в институте «Institut fuer Werkzeugmaschinen und Umformtechnik» Технического университета г. Кемнитц и техсовете фирмы по производству шлифовальных инструментов «Rottluff» GmbH (Германия) при прохождении там трёх стажировок. Отдельные результаты диссертационной работы получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект № FSFS-2025-0006).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликованы 90 научных работ (в том числе 22 статьи – в журналах, входящих в перечень ВАК, 2 из которых также проиндексированы в ядре Web of Science, 9 публикаций – на английском языке в изданиях Scopus и Web of Science, 2 монографии в издательствах «Машиностроение» и «Инфра-Инженерия»), получено 3 патента РФ на изобретения и 9 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 362 страницах машинописного текста, содержит 124 рисунка, 7 таблиц, список литературы из 313 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана её общая характеристика, указана цель исследований и перечислены задачи по её достижению, сформулирована научная новизна и отражены практическая значимость и реализация работы, отмечены используемые методы и средства исследований, приведены сведения по апробации и опубликованию результатов работы.

**В первой главе** проведён анализ отечественных и зарубежных патентно-литературных источников, стандартов, нормативов, технических условий и известных результатов изучения эксплуатационных характеристик абразивных зёрен, а также опыт производства и применения абразивных инструментов. Сформулирована цель данной работы и намечены задачи по её достижению.

**Во второй главе** сформулирован алгоритм создания и рационального применения абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен, состоящий в том, что:

– для прогнозирования эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов на этапе проектирования целесообразно изучить геометрию зёрен, из

которых они изготавливаются, а именно установить зависимость величин передних углов зёрен от факторов их формы и ориентации;

– целесообразно установить зависимость максимальных напряжений в зёрнах от факторов их формы и ориентации, для чего необходимо проанализировать схему работы шлифовального инструмента, установить величины и соотношения составляющих силы резания, действующие на зёрна;

– совместный анализ получаемых зависимостей позволяет проектировать шлифовальные инструменты под конкретные задачи и условия обработки, исходя из характера влияния передних углов зёрен на режущую способность инструментов, деформации, температуры и шероховатость обрабатываемых поверхностей, а также влияния уровня напряжения в зёрнах на износ и стойкость инструментов.

В главе отражены результаты исследований взаимосвязи формы и ориентации зёрен с их геометрическими и эксплуатационными характеристиками. Для количественной оценки формы зёрен использован существующий метод (на плоскости) и разработан оригинальный метод (в трёхмерном пространстве), основанный на определении коэффициента формы ( $K_{\phi}$ ), как отношения диаметров сфер, описанных и вписанных в зерно. Для реализации метода разработаны алгоритмы и программное обеспечение (свидетельство о госрегистрации ПрЭВМ № 2006613051).

На основе анализа технологий по упорядочению формы зёрен, для данной работы выбран вибрационный способ разделения абразивной массы на ряд фракций с упорядоченной формой зёрен, который и взят за основу.

Разработаны методы и программное обеспечение (свидетельство на ПрЭВМ № 2007612468) для оценки площади поверхности зёрен ( $S$ ) и их количества ( $N$ ) в единице объёма. С их помощью установлено, что с увеличением  $K_{\phi}$  зёрен увеличивается площадь их поверхности, а также количество зёрен в единице объёма, что, например, для зёрен 13AF30 описывается следующими моделями:

$$S = -387800 + 70879,7 \cdot K_{\phi} + 3572,05 \cdot D_{\text{вп}} ; \quad (1)$$

$$N = 1876,5 \cdot e^{0,150 \cdot K_{\phi}} . \quad (2)$$

Получены зависимости величин передних углов шлифовальных зёрен от их формы, пространственной ориентации в теле инструмента и износа. С помощью разработанной программы для ЭВМ (свидетельство на ПрЭВМ № 2008614244), установлено, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют произвольно ориентированные зёрна, тем больше их передние углы. Для зёрен марок 13AF30 и 53CF54 эти зависимости имеют вид:

$$13AF30: \quad \gamma = -83,971 + 25,944 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (3)$$

$$53CF54: \quad \gamma = -82,136 + 23,966 \cdot \ln(K_{\phi}) . \quad (4)$$

Установлено также, что при радиальной ориентации зёрен ( $\Theta = 90^{\circ}$ ) передние углы при их вершинах становятся больше с увеличением  $K_{\phi}$ . При тангенциальной ориентации зёрен ( $\Theta = 0^{\circ}$ ) передние углы при вершинах зёрен с ростом коэффициента формы уменьшаются. Эти зависимости для зёрен марки 13AF46 описываются моделями:

$$\Theta = 90^{\circ}: \quad \gamma = -74,11 + 15,38 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (5)$$

$$\Theta = 0^{\circ}: \quad \gamma = -60,33 - 5,08 \cdot \ln(K_{\phi}) . \quad (6)$$

Разработана методика, позволяющая оценивать передние углы ориентированных шлифовальных зёрен с контролируемой формой по всему контуру перед-

ней поверхности с учётом их износа. Необходимость такой оценки обусловлена тем, что зерно в процессе работы изнашивается и после удаления вершины участвовать в процессе резания начинают последующие его элементы с другими величинами передних углов (рисунок 1).

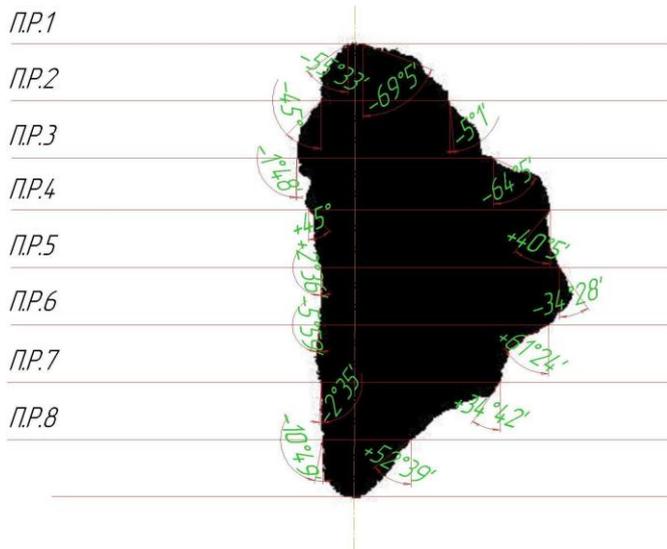


Рисунок 1 – Величины передних углов радиально ориентированного шлифовального зерна 13AF46 по периметру контура (вдоль наибольшей оси) в точках пересечения с плоскостями резания (П.Р.) через дискретный интервал износа.

Установлено, что независимо от величины износа с ростом коэффициента формы передние углы радиально ориентированных шлифовальных зёрен увеличиваются. При этом, чем дольше зерно работает, т.е. изнашивается вдоль главной оси  $L$  с образованием площадки износа и находится в теле инструмента, тем больше (в среднем) становится его передний угол. Установленные зависимости для зёрен марки 13AF46 отражаются моделями:

$$\text{Износ до } 1/3 L: \quad \gamma = -44,91 + 18,61 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (7)$$

$$\text{Износ до } 1/2 L: \quad \gamma = -32,69 + 13,41 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (8)$$

$$\text{Износ до } 2/3 L: \quad \gamma = -22,38 + 9,02 \cdot \ln(K_{\phi}) . \quad (9)$$

Для оценки зависимости передних углов шлифовальных зёрен от их формы и ориентации разработан программный комплекс в составе четырёх программ для ЭВМ (№ 2011614263, № 2011615114, № 2011616506, № 2015619877), который позволяет поворачивать исследуемые изображения зёрен под требуемым углом относительно плоскости резания и определять передний угол во всех точках (пикселях) их контура с учётом факторов формы и износа, а также получать геометрические модели зёрен для анализа их напряжённого состояния при работе.

На примере шлифовальных зёрен марки 13A зернистости F46 установлено (рисунок 2), что форма и ориентации зёрен относительно плоскости резания весьма существенно влияют на величины их передних углов.

Так, например, при  $K_{\phi} = 1,6$  передние углы зёрен в зависимости от угла ориентации  $\Theta$  варьируются в пределах  $-60^{\circ} \div -6^{\circ}$  (износ до  $1/3L$ ) и  $-44^{\circ} \div +9^{\circ}$  (износ до  $2/3L$ ). При  $K_{\phi} = 4,8$  передние углы изменяются в диапазоне  $-77^{\circ} \div +39^{\circ}$  (износ до  $1/3L$ ) и  $-69^{\circ} \div +49^{\circ}$  (износ до  $2/3L$ ). Таким образом, одно и то же зерно, по-разному ориентированное относительно плоскости резания, имеет значительную разницу передних углов, которая достигает  $53^{\circ} \div 54^{\circ}$  у изометрических зёрен ( $K_{\phi} = 1,6$ ) и  $116^{\circ} \div 118^{\circ}$  у игольчато-пластинчатых зёрен ( $K_{\phi} = 4,8$ ).

В зависимости от угла ориентации при увеличении  $K_{\phi}$  зёрен может происходить как увеличение, так и уменьшение их передних углов. Так, с увеличением  $K_{\phi}$  зёрен в диапазоне углов ориентации  $\Theta = 10^{\circ} \div 125^{\circ}$  их передние углы возрастают. У тангенциально ориентированных зёрен ( $\Theta = 0^{\circ}$  ( $180^{\circ}$ )) и зёрен с близкими

направлениями ориентации ( $\Theta = 135^\circ \div 180^\circ$ ) наблюдается обратная картина. Кроме того, независимо от  $K_\Phi$  и  $\Theta$ , чем дальше зерно изнашивается с образованием площадки износа, тем больше его передний угол. Аналогичным образом происходит увеличение передних углов зёрен с ростом сечений срезаемых стружек.

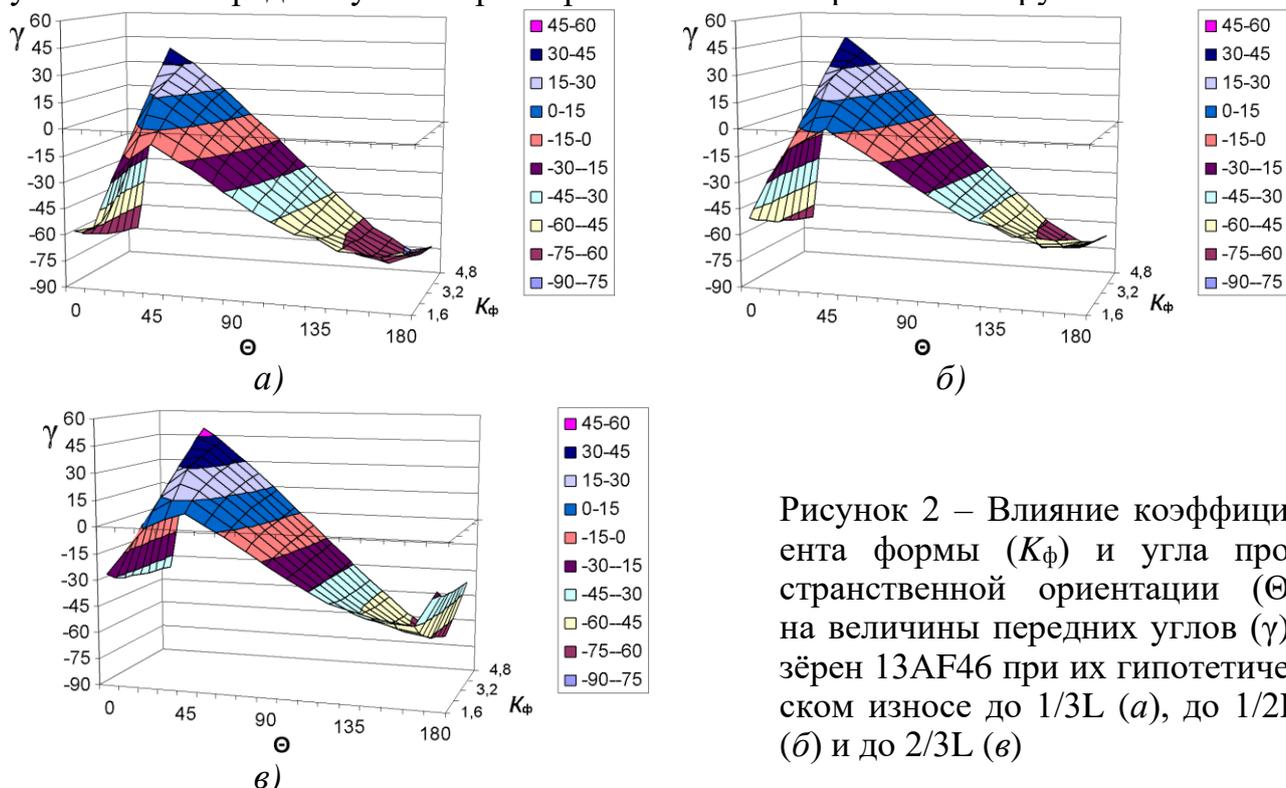


Рисунок 2 – Влияние коэффициента формы ( $K_\Phi$ ) и угла пространственной ориентации ( $\Theta$ ) на величины передних углов ( $\gamma$ ) зёрен 13AF46 при их гипотетическом износе до  $1/3L$  (а), до  $1/2L$  (б) и до  $2/3L$  (в)

Полученные данные также показывают, что передние углы зёрен достигают максимальных значений при их ориентации вершинами навстречу силе резания ( $\Theta = 22,5^\circ \div 90^\circ$ , в особенности при  $\Theta = 22,5^\circ \div 45^\circ$ ). Минимальные значения передних углов зёрен достигаются при их тангенциальной ориентации ( $\Theta = 0^\circ$  ( $180^\circ$ )) и ориентации вершинами по направлению  $P_z$  ( $100^\circ \div 180^\circ$ ).

Математический анализ полученных данных (см. рисунок 2) показывает, что передние углы шлифовальных зёрен соотносятся с коэффициентами формы и углами ориентации посредством тригонометрических рядов с периодом  $\pi$ :

Износ до  $1/2 L$ :

$$\gamma = a_0/2 + a_1 \cdot \cos(1 \cdot 2 \cdot \Theta) + b_1 \cdot \sin(1 \cdot 2 \cdot \Theta) + \dots + a_8 \cdot \cos(8 \cdot 2 \cdot \Theta) + b_8 \cdot \sin(8 \cdot 2 \cdot \Theta), \quad (10)$$

где  $a_0(K_\Phi) \div b_8(K_\Phi)$  приведены в полном виде в тексте диссертации.

Разработана методика и проведён анализ напряжённого состояния моделей зёрен марки 13AF46 в программном комплексе «SolidWorks» с учётом их формы, пространственной ориентации и глубины заделки в связку (рисунок 3 – рисунок 6) для случая обработки заготовок (труб  $21,3 \times 2,8$  из стали 10) отрезными шлифовальными кругами Тип 41 230 $\times$ 4 $\times$ 32 13A F46 S BF 80 м/с на скорости  $V = 80$  м/с с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу  $P_y = 32$  Н. Программные настройки: линейная упругая изотропная модель; материал – нормальный электрокорунд; тип сетки – сетка на твёрдом теле на основе кривизны, 4 точки Якобиана, максимальный размер элемента 0,00968809 мм; минимальный размер элемента 0,00322933 мм. Критерий прочности – критерий максимального нормального напряжения. Величины составляющих силы резания, действующие на единичные зёрна на поверхности круга при работе:  $P_y = 0,533$  Н;  $P_z = 0,141$  Н.

Установлено, что наименьшие напряжения возникают в зёрнах при тангенциальной ориентации ( $\Theta = 0^\circ$ ). Далее, в диапазоне  $\Theta = 5^\circ \div 45^\circ$  напряжения растут, достигая максимумов в «зоне справа» под консолью выступающей части зерна. В диапазоне  $\Theta = 45^\circ \div 67,5^\circ$  происходит снижение максимальных напряжений до значений, близких к  $\Theta = 0^\circ$ .

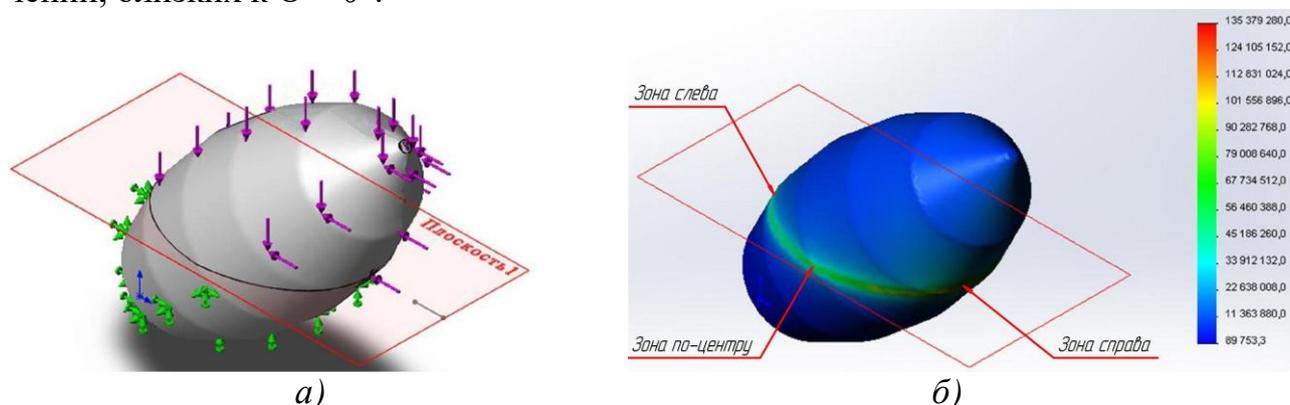


Рисунок 3 – Схема нагружения (а) и картина напряжений по границе заделки в связку (б) в модели зерна 13AF46 с  $K_\phi = 2,4$  и углом ориентации  $\Theta = 45^\circ$ , до  $1/2L$  закреплённой в связке

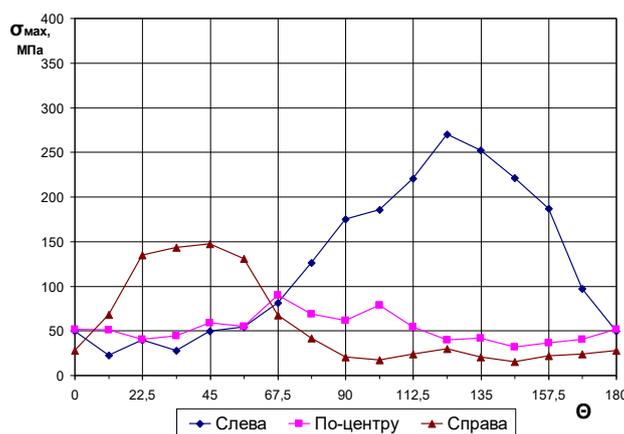


Рисунок 4 – Напряжения в модели шлифовального зерна 13AF46, закреплённой до  $1/2L$ , с  $K_\phi = 2,4$  по границе заделки в связку при различных углах ориентации

Это снижение происходит в результате равномерного распределения напряжений в объёме зерна за счёт того, что угол ориентации  $\Theta = 67,5^\circ$  близок к направлению вектора силы резания  $P$ . При последующем увеличении угла ориентации до  $\Theta = 124^\circ$  происходит значительный рост напряжений. Максимально нагруженная зона здесь – «зона слева» под консолью выступающей части зерна.

Таким образом, более рациональным является ориентирование зёрен вершинами навстречу направлению действия силы резания  $P$  (см. рисунок 5).

Показано также, что для всех углов ориентации при увеличении коэффициента формы зёрен уровень напряжений в них существенно возрастает. С уменьшением глубины заделки зерна в связку максимальные напряжения в зёрнах также значительно увеличиваются (см. рисунок б).

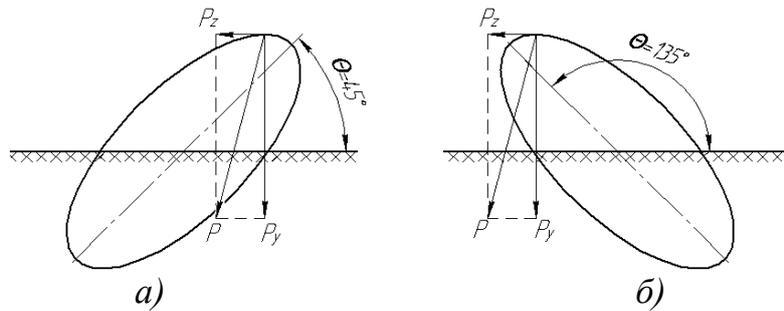


Рисунок 5 – Направление действия силы резания по отношению к главной оси зерна при его расположении вершиной навстречу (а) и по направлению  $P_z$  (б)

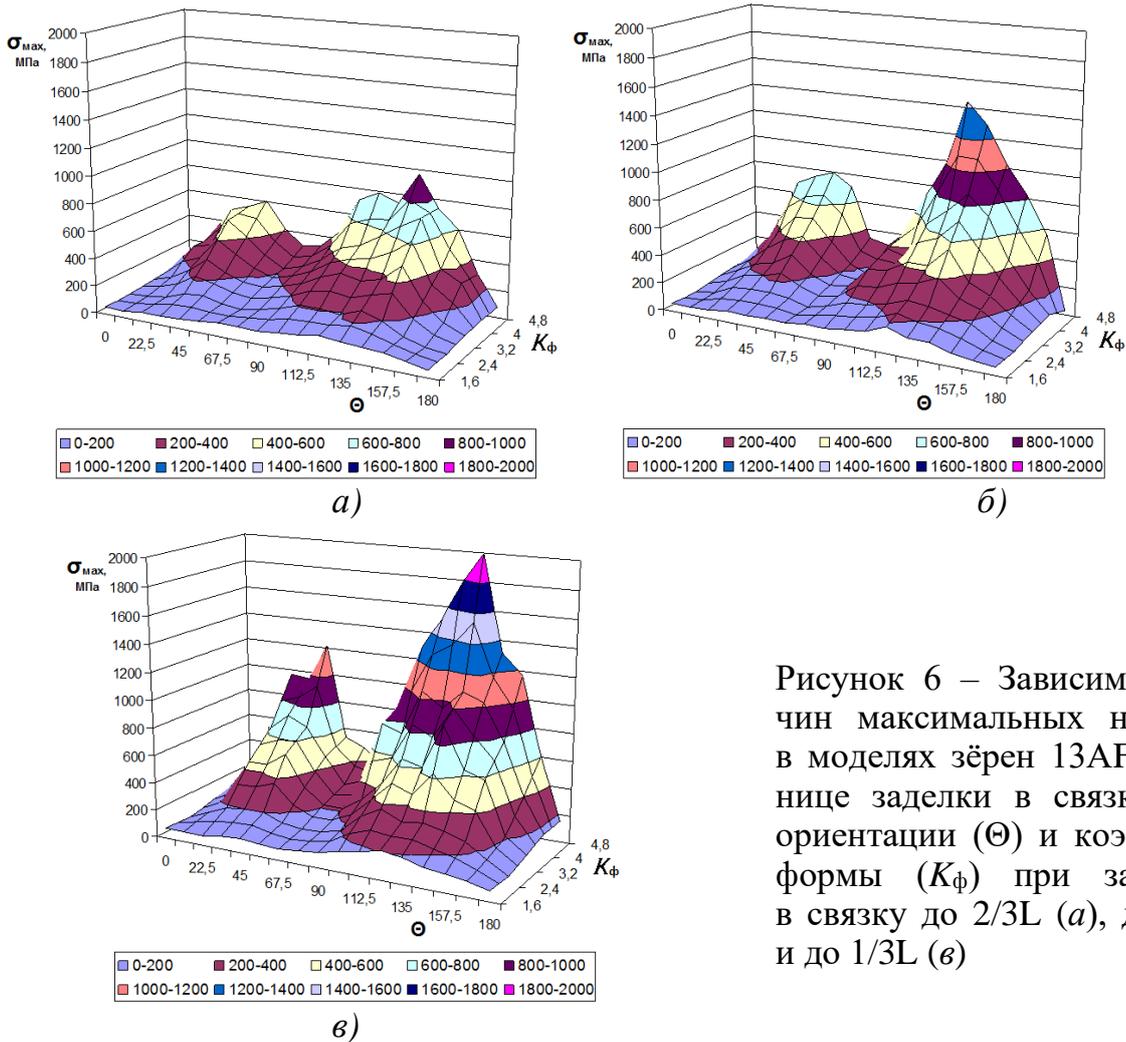


Рисунок 6 – Зависимости величин максимальных напряжений в моделях зёрен 13AF40 по границе заделки в связку от угла ориентации ( $\Theta$ ) и коэффициента формы ( $K_\Phi$ ) при закреплении в связку до  $2/3L$  (а), до  $1/2L$  (б) и до  $1/3L$  (в)

Анализ данных (рисунок б) показывает, что максимальные напряжения в шлифовальных зёрнах по границе заделки в связку соотносятся с коэффициентами их формы и углами ориентации посредством тригонометрических рядов с периодом  $\pi$ :

Закрепление в связке до  $1/2 L$ :

$$\sigma_{\max} = a_0/2 + a_1 \cdot \cos(1 \cdot 2 \cdot \Theta) + b_1 \cdot \sin(1 \cdot 2 \cdot \Theta) + \dots + a_8 \cdot \cos(8 \cdot 2 \cdot \Theta) + b_8 \cdot \sin(8 \cdot 2 \cdot \Theta), \quad (11)$$

где  $a_0(K_\Phi) \div b_8(K_\Phi)$  приведены в полном виде в тексте диссертации

Для проверки результатов оценки влияния формы и ориентации зёрен на их напряжённое состояние применен метод одноосного сжатия и сконструирована установка, которая в автоматическом режиме позволяет определять усилия разрушения зёрен. С помощью данной установки проведена серия прочностных испы-

таний абразивных зёрен 2-х марок и 4-х зернистостей (13AF10, 13AF20, 13AF30, 53CF24), которая подтвердила, что прочность зёрен зависит как от их формы, так и от ориентации. Результаты исследований показали, что наиболее рациональным с точки зрения прочности зёрен при одноосном сжатии является вариант их тангенциальной ориентации ( $\Theta = 0^\circ$ ), далее по убыванию следует случай их радиальной ориентации ( $\Theta = 90^\circ$ ), когда главные оси зёрен совпадают с вектором воздействующей сжимающей нагрузки, затем  $\Theta = 65^\circ \div 75^\circ$  ( $115^\circ \div 105^\circ$ ) и наименее рациональными являются углы ориентации  $\Theta = 45^\circ \div 22^\circ$  ( $135^\circ \div 157^\circ$ ). Разница в прочности различно ориентированных зёрен тем более заметна, чем больший коэффициент формы они имеют. Показано также, что при всех углах ориентации зёрен, чем меньше их коэффициент формы ( $K_\Phi$ ), тем они прочнее.

Выявленные зависимости для зёрен марки 13AF10 отражены в виде графиков на рисунке 7 и представлены математическими моделями (12)–(16).

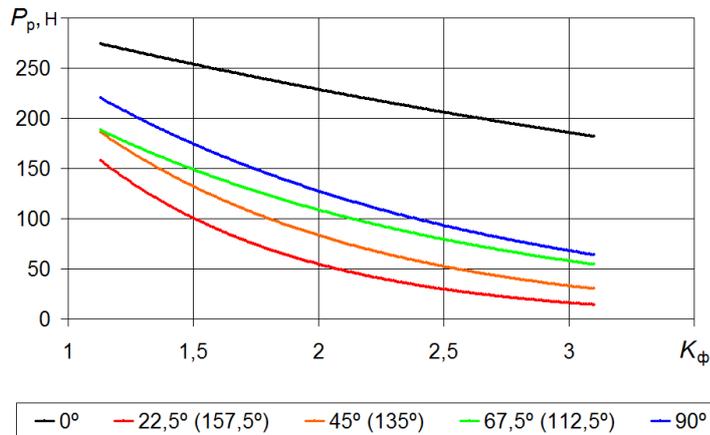


Рисунок 7 – Зависимости усилия разрушения ( $P_p$ ) шлифовальных зёрен 13AF10 от коэффициента формы ( $K_\Phi$ ) при различных углах ориентации ( $\Theta$ )

$\Theta = 0^\circ$ :	$P_p = 347,03 \cdot e^{-0,209 \cdot K_\Phi}$ ;	(12)
$\Theta = 22^\circ 30' (157^\circ 30')$ :	$P_p = 626,27 \cdot e^{-1,220 \cdot K_\Phi}$ ;	(13)
$\Theta = 45^\circ (135^\circ)$ :	$P_p = 528,82 \cdot e^{-0,925 \cdot K_\Phi}$ ;	(14)
$\Theta = 67^\circ 30' (112^\circ 30')$ :	$P_p = 382,84 \cdot e^{-0,630 \cdot K_\Phi}$ ;	(15)
$\Theta = 90^\circ$ :	$P_p = 447,19 \cdot e^{-0,628 \cdot K_\Phi}$ .	(16)

Для сопоставления результатов оценки напряжённого состояния зёрен в шлифовальных кругах с результатами прочностных испытаний шлифовальных зёрен методом одноосного сжатия, ввиду различий в схемах нагружения зёрен, проведён анализ напряжений, возникающих в зёрнах под воздействием силы резания  $P$  (совместного воздействия её составляющих  $P_y$  и  $P_z$ ) и отдельного воздействия сжимающей нагрузки  $P_y$  (рисунок 8).

Полученные данные показывают, что график распределения максимальных напряжений в шлифовальных зёрнах при различных углах ориентации от действия сжимающей силы  $P_y$  соответствует результатам испытаний на прочность ориентированных зёрен методом одноосного сжатия (см. рисунок 7). Установлено также, что наличие  $P_z$  в сравнении со случаем одноосного сжатия зёрен приводит к тому, что наименьшие максимальные напряжения в них (после варианта тангенциальной ориентации) фиксируются при углах  $\Theta$ , практически совпадающих или близких с направлением вектора силы резания  $P$ . Кроме того, воздействие  $P_z$  в диапазоне углов ориентации  $\Theta = 0^\circ \div 90^\circ$  приводит к более равномерному распределению напряжений в теле зёрен и снижению их максимальных величин, а в диапазоне углов ориентации  $\Theta = 90^\circ \div 180^\circ$  – к концентрации напряжений под консолью выступающей части зёрен и росту их значений.

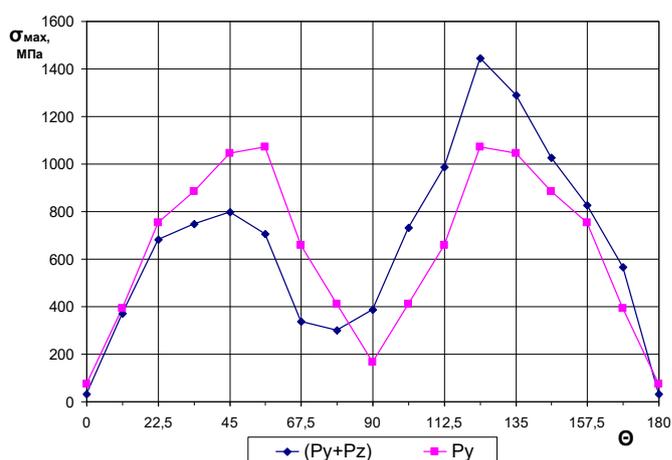


Рисунок 8 – Максимальные напряжения в модели зерна 13AF46 с  $K_{\phi}=4,8$  по границе заделки в связку при различных углах ориентации, закреплении до  $1/2L$  под действием силы резания (векторная сумма  $P_y + P_z$ ) и отдельно  $P_y$

В главе также представлены исследования износа зёрен в моделях шлифовальных кругов из зёрен марки 13AF10 и оптически прозрачной связки – эпоксидной смолы, близкой по свойствам бакелитовой связке. Изготовлены и испытаны модели кругов с радиальной ( $\Theta = 90^\circ$ ) и тангенциальной ориентацией зёрен ( $\Theta = 0^\circ$ ), а также с ориентацией зёрен вершинами навстречу направлению  $P_z$  ( $\Theta = 45^\circ$ ) и по направлению  $P_z$  ( $\Theta = 135^\circ$ ). Оптически прозрачная связка позволяла визуально наблюдать и анализировать с помощью специальной программы для ЭВМ (свидетельство № 2008610817) износ каждого отдельного зерна, выходящего на рабочую поверхность инструмента. Благодаря этому установлено, что полное время работы (стойкость) зёрен ( $T$ ) в моделях кругов колеблется в интервале  $0,8 \div 4,5$  с и зависит от формы зёрен и их ориентации в теле инструмента (рисунок 9).

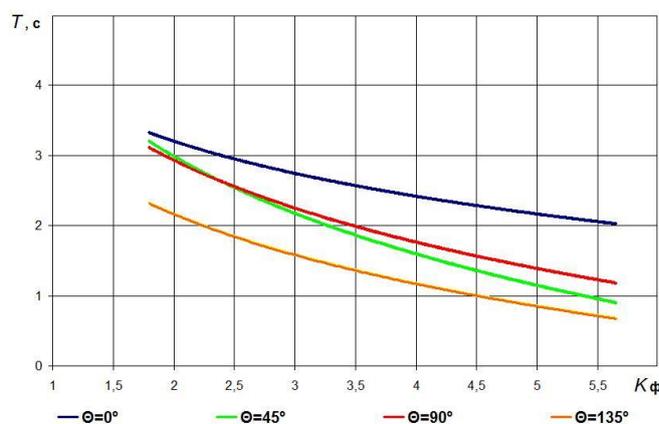


Рисунок 9 – Стойкость шлифовальных зёрен 13AF10 ( $T$ ) в моделях отрезных кругов в зависимости от коэффициента их формы ( $K_{\phi}$ ) и угла ориентации ( $\Theta$ )

При всех углах ориентации зёрен их стойкость уменьшается с ростом коэффициента формы. Наибольшей стойкостью обладают тангенциально ориентированные зёрна. При  $\Theta = 90^\circ$  стойкость зёрен ниже, чем при  $\Theta = 0^\circ$ , причём эта разница возрастает по мере увеличения коэффициента формы. Стойкость зёрен, ориентированных вершинами навстречу  $P_z$  под углом порядка  $\Theta = 45^\circ$ , в среднем, несколько ниже, но близка к стойкости радиально ориентированных зёрен. Наименьшую стойкость имеют зёрна, ориентированные вершинами по направлению  $P_z$  ( $\Theta = 135^\circ$ ). Для них характерен износ в виде скалывания, объёмного разрушения, а также быстрого вырыва из связки. Выявленные зависимости (рисунок 9) отражаются математическими моделями:

$$\Theta = 0^\circ : T = 3,989 - 1,135 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (17)$$

$$\Theta = 45^\circ : T = 4,382 - 2,011 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (18)$$

$$\Theta = 90^\circ : T = 4,100 - 1,687 \cdot \ln(K_{\phi}) ; \quad (19)$$

$$\Theta = 135^\circ: \quad T = 3,158 - 1,433 \cdot \ln(K_\phi) . \quad (20)$$

Представленный алгоритм, методология исследований, программное обеспечение и оборудование для оценки геометрических, прочностных и стойкостных показателей зёрен, а также результаты исследований, полученные с их помощью, позволили уяснить общий механизм влияния факторов формы и ориентации зёрен на их геометрические, прочностные и стойкостные показатели и установить, что:

- для достижения максимальных передних углов у зёрен и, соответственно, максимальной режущей способности шлифовальных инструментов необходимо применять игольчато-пластинчатые зёрна (с наибольшими  $K_\phi$ ) и располагать их в инструментах под углами ориентации  $\Theta = 22,5^\circ \div 90^\circ$  (в особенности  $\Theta = 22,5^\circ \div 45^\circ$ );
- для обеспечения максимальной стойкости инструментов, при прочих равных условиях, целесообразно использовать зёрна изометрической формы (с минимальными  $K_\phi$ ), а также ориентировать зёрна в тангенциальном направлении ( $\Theta = 0^\circ$ ).
- шлифовальные инструменты с повышенной режущей способностью и одновременно с достаточно высокой стойкостью можно изготовить, ориентируя шлифовальные зёрна под углами близкими к направлению вектора силы резания  $P$ , действующей на инструмент в процессе эксплуатации;
- исходя из того, что соотношение составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$  для различных операций шлифования, как правило, варьируется в интервале от 1,2:1 до 10:1, то рациональные углы ориентации зёрен соосно силе резания находятся в диапазоне  $\Theta = 50^\circ \div 84^\circ$ ;
- для шлифовальных кругов, изготавливаемых из зёрен нормальных электрокорундов и используемых для обработки конструкционных сталей, при эксплуатации которых радиальная составляющая силы резания  $P_y$  в 3÷5 раз превосходит тангенциальную составляющую  $P_z$ , может быть рекомендован рациональный угол ориентации зёрен порядка  $\Theta = 65^\circ \div 75^\circ$ .

Полученные результаты и зависимости ((1)...(20)) позволили перейти к этапу конструирования инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен.

**В третьей главе** в качестве основы для разработки технологии по производству новых инструментов с заданной формой и ориентацией взята типовая технология изготовления шлифовальных инструментов на бакелитовой связке (на примере отрезных шлифовальных кругов).

Проведен анализ известных способов и технологий ориентации зёрен в шлифовальных инструментах. Сделан вывод о том, что наиболее перспективным по потенциальным возможностям и достигаемому результату является подход, основанный на использовании электростатического эффекта. Исходя из этого, разработан способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами (патент РФ на изобретение № 2369474), в основу которого положен данный эффект (рисунок 10). Суть способа состоит в том, что исходные зёрна (обычные, либо с упорядоченной формой) смешивают с увлажнителями, связующими и наполнителями и образующую полусухую формовочную абразивную смесь 9 начинают просеивать через вибрирующее сито 10. Абразивные гранулы 11, падая вниз в прессформу в виде множества отдельных частиц, попадают в зону действия электростатического поля, создаваемого электродами 6, ориентируются в нём наибольшими осями вдоль силовых линий поля и постепенно заполняют прессформу. Электроды из тонкого листового металла собраны в единую конструкцию с помощью корпуса 7 из диэлектрика и могут иметь различное расположение, в зависимости от требуемой ориентации зёрен: кольцевое – для радиальной ориентации зёрен, радиальное расположение – для тангенциальной ориентации зёрен,

наклонное – для ориентации зёрен в теле инструмента под некоторым углом (рисунок 11).

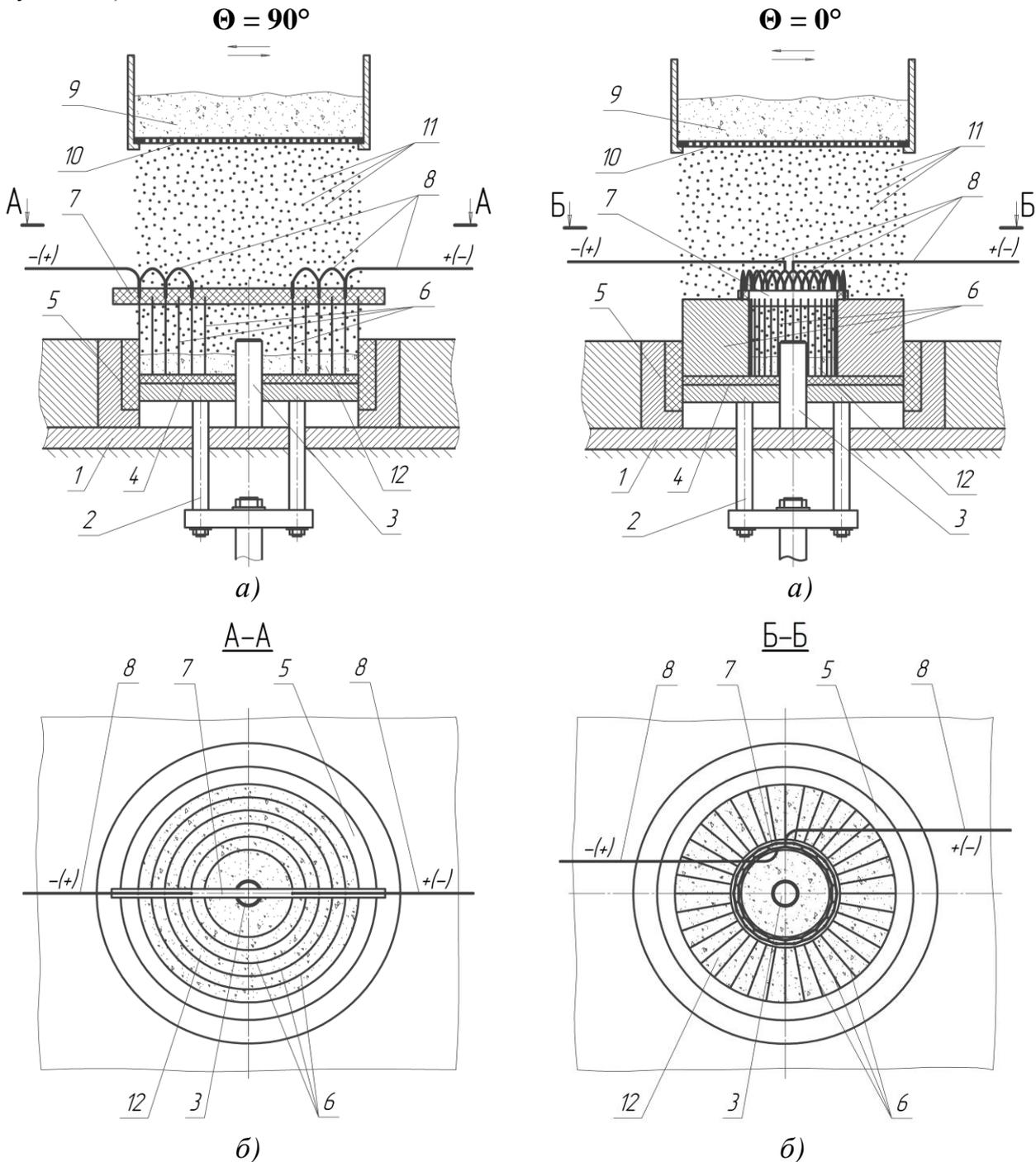


Рисунок 10 – Укладка абразивной смеси (а) и расположение электродов (б) при радиальной ( $\Theta = 90^\circ$ ) и тангенциальной ( $\Theta = 0^\circ$ ) ориентации зёрен в круге

После заполнения прессформы укладку абразивной смеси прекращают, электроды извлекают из прессформы вертикально вверх, при необходимости излишки абразивной смеси, выступающей за уровень кольца прессформы, удаляют, после чего осуществляют формование, извлекают заформованный инструмент из прессформы и подвергают термообработке. При изготовлении инструментов с упрочняющими стеклосетками и втулками электроды вводят и извлекают из прессформы в соответствии с количеством укладываемых слоев абразивной смеси.

Предлагаемая технология позволяет изготавливать твердотельные шлифовальные инструменты (круги, бруски, сегменты, головки) с различными направлениями ориентации зёрен (радиальным, тангенциальным, наклонным), на разных типах связок, обеспечивает высокую размерную точность изделий, наличие в них, при необходимости, упрочняющих элементов и повышает эксплуатационные возможности инструментов.

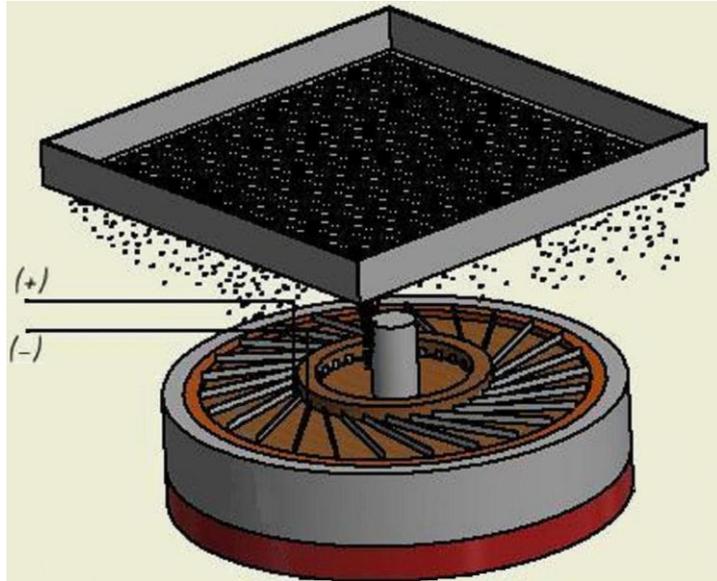


Рисунок 11 – Укладка абразивной смеси и расположение электродов при наклонной ориентации зёрен в шлифовальном круге

В соответствии с описанной технологией изготовлены опытные партии кругов различных конструкций, которые в дальнейшем прошли комплексные испытания в лабораторных, а, затем, в производственных условиях, где продемонстрировали свои преимущества по отношению к стандартным инструментам (глава 6).

Эффективность ориентирования зёрен в шлифовальных инструментах, изготовленных в соответствии с разработанным способом, наглядно подтверждается при анализе торцевых поверхностей таких инструментов с помощью специально разработанной программы для ЭВМ (свидетельство № 2017663831) (рисунок 12). Исследования показали, что около 60 % зёрен в опытных кругах сориентированы с отклонением от заданного направления ориентации не более 15°.

В главе также проведен анализ возможностей повышения эксплуатационных показателей шлифовальных кругов в направлении упорядочения внутренней структуры абразивного композита этих инструментов за счёт подбора определённой формы зёрен. В результате разработан способ повышения работоспособности шлифовальных кругов на бакелитовой связке за счёт применения зёрен игольчато-пластинчатых разновидностей мелких зернистостей, располагаемых в наиболее нагруженной от действия центробежной силы зоне вблизи посадочного отверстия кругов (патент РФ на изобретение № 2349446). Благодаря такой конструкции круги приобретают повышенную прочность на разрыв и, как следствие, более высокую скорость шлифования. Наблюдаемое повышение прочности кругов на бакелитовой связке за счёт изготовления зоны у посадочного отверстия из зёрен с большими коэффициентами формы объясняется тем, что такие зёрна, по сравнению с другими, имеют более развитую поверхность (глава 2). Как следствие, они обла-

дают большей площадью контакта со связкой и лучшей адгезией с ней. Разработана технология и технологическая оснастка для изготовления таких кругов.

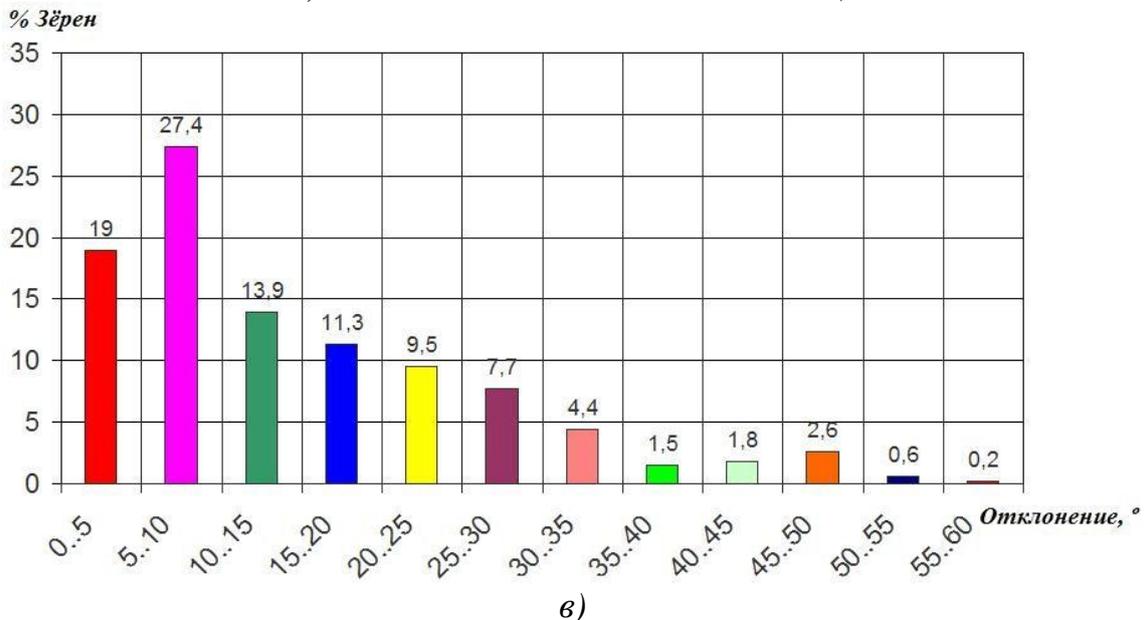
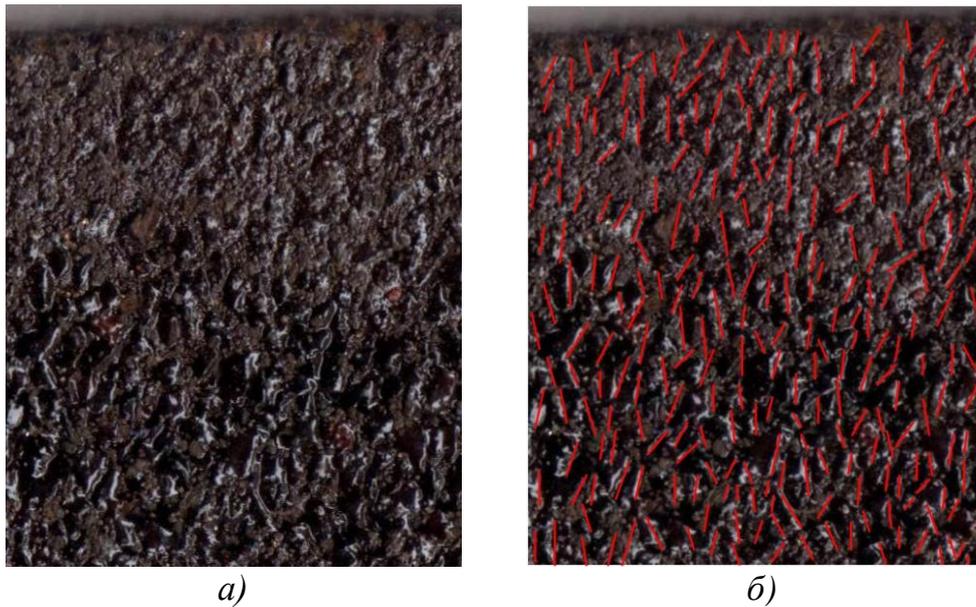


Рисунок 12 – Изображение торцевой поверхности круга Тип 41 230×3×32 13А F46 [Θ] S B 50 м/с с радиальной ориентации зёрен до (а) и после обработки в редакторе «Компас» (б) и результаты оценки отклонений зёрен от заданного направления ориентирования (в)

Последующие прочностные испытания шлифовальных кругов данной конструкции показали, что их скорость разрыва увеличивается на 12÷30 % (в зависимости от наличия армирующих стеклосеток), за счет чего максимальная допустимая скорость шлифования кругами увеличивается на 10÷15 м/с (глава 4), что приводит к существенному повышению ряда эксплуатационных показателей этих инструментов (глава 5).

**В четвертой главе** проведен анализ способов и средств контроля одного из наиболее важных эксплуатационных показателей шлифовальных кругов – их прочности, влияющей на безопасность работы, допустимую скорость работы и, как следствие, – на производительность и качество шлифования. Актуальность та-

кого контроля в полной мере касается и новых конструкций шлифовальных кругов из зёрен с заданной геометрией, для которых проведена серия испытаний и получены результаты по установлению пределов их прочности.

Разработан стенд на базе станка 3А64Д для динамических испытаний кругов путём доведения их скорости вращения до определённой величины или до разрыва. Стенд обеспечивает бесступенчатое регулирование частоты вращения шпинделя в пределах 800÷18500 об/мин, что обеспечивает скорости испытания кругов с наружным диаметром 230 мм в диапазоне 10÷220 м/с.

Разработан также статический способ прочностных испытаний шлифовальных кругов (патент РФ на изобретение № 2292032). Способ базируется на нагружении посадочных отверстий кругов в неподвижном состоянии равномерно распределённым давлением, которое вызывает в теле инструментов тангенциальные растягивающие напряжения, характер распределения и величины которых соответствуют напряжениям во вращающемся круге. Математически описана взаимосвязь испытательной скорости с аналогичным ей по воздействию равномерно распределённым давлением.

Проведены динамические и статические испытания опытных кругов с контролируемой формой зёрен, которые показали, что, увеличивая  $K_{\phi}$  зёрен можно, при прочих равных условиях, повысить разрывную прочность кругов на бакелитовой связке и, как следствие, – их рабочую скорость. Так, помещая в зону у посадочного отверстия кругов с характеристиками Тип 41 230×3×22 13AF30 S BF и Тип 41 230×3×22 13AF30 S B зёрна 53CF54 с большими величинами  $K_{\phi}$  (игольчато-пластинчатой формы) можно добиться повышения средней скорости их разрыва на 12÷30 % и повысить максимальную рабочую скорость кругов с 80 до 90 м/с и с 50 до 65 м/с соответственно.

**В пятой главе** проведены комплексные испытания отрезных шлифовальных кругов с заданной формой зёрен по схеме резания с постоянным усилием прижатия заготовок ( $P_y = \text{const}$ ) и по схеме круглого врезного шлифования ( $S_{\text{круга}} = \text{const}$ ). Испытывались круги из зёрен различных марок и зернистостей, с упрочняющими элементами и без них. Испытания проводились на различных скоростях шлифования и на предварительно подобранных рациональных режимах резания, без применения смазочно-охлаждающих жидкостей. Оценивались режущая способность, коэффициент шлифования, эффективная мощность резания и энергозатраты при эксплуатации кругов с контролируемой формой зёрен (рисунок 13, рисунок 14). Исследовались также теплонапряжённость процесса резания, изменения микротвёрдости и микроструктуры металла вблизи плоскости отрезки и шероховатости поверхностей, обработанных кругами с разной формой зёрен (рисунок 15).

По результатам испытаний установлено, что при переходе от изометрических зёрен к зёрнам игольчато-пластинчатой формы (т.е. с ростом их  $K_{\phi}$ ) режущая способность шлифовальных кругов возрастает в 1,14÷1,51 раза в зависимости от марки абразива, схемы и режимов шлифования. Основной причиной этого является увеличение передних углов зёрен с ростом их  $K_{\phi}$ . Соответственно, режущие клинья шлифовальных зёрен меньше деформируют обрабатываемый материал и лучше внедряются в обрабатываемую поверхность. Кроме того, чем выше  $K_{\phi}$  зёрен, тем большее их число находится в единице насыпного объёма абразива и в объёме инструмента. В результате, режущая способность кругов из зёрен игольчато-пластинчатой формы до 19 % выше, чем у обычных инструментов из неупорядоченных по форме зёрен.

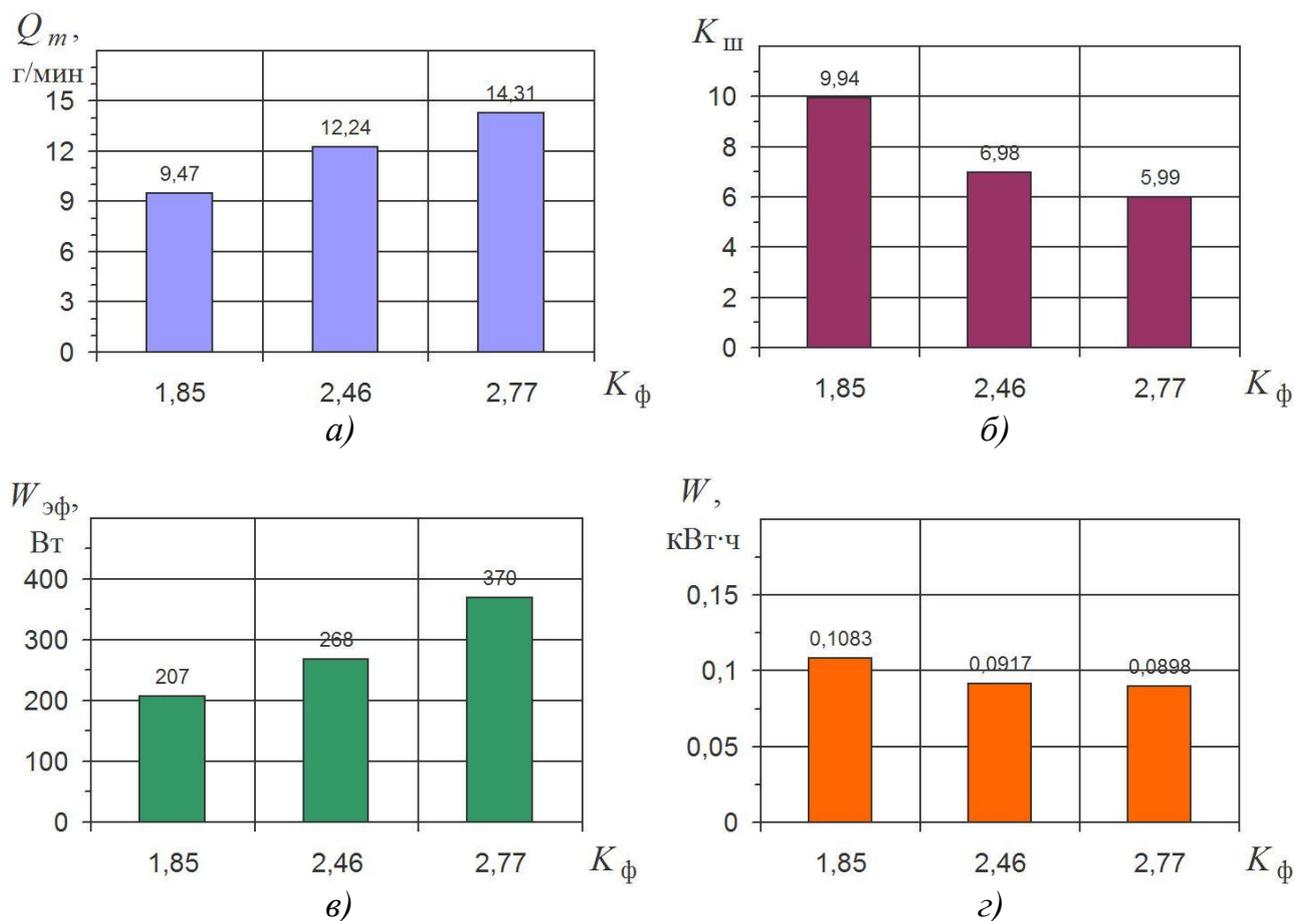


Рисунок 13 – Режущая способность (а), коэффициент шлифования (б), эффективная мощность (в), энергозатраты (г) у кругов 230×3×32 13AF30 [ $K_\phi$ ] СТЗ Б 50 м/с с заданной формой зёрен при обработке заготовок по схеме с  $P_y = \text{const}$

Установлено также, что с уменьшением  $K_\phi$  зёрен коэффициент шлифования кругов повышается в 1,45÷1,91 раза в зависимости от марки и зернистости абразива, схемы и режимов резания. Так,  $K_\text{ш}$  кругов из зёрен изометрической формы на 25÷42 % выше, чем у обычных инструментов из исходных, неразделённых по форме зёрен. Объясняется это тем, что с уменьшением  $K_\phi$  снижаются напряжения в зёрнах при работе, повышается их прочность и стойкость.

Эффективная мощность резания у инструментов с увеличением  $K_\phi$  зёрен при схеме отрезного шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок ( $P_y = \text{const}$ ) возрастает в 1,26÷1,79 раза, а при круглом врезном шлифовании ( $S_{\text{круга}} = \text{const}$ ), напротив, снижается в 1,38÷2,2 раза. Обусловлено это тем, что зёрна игольчато-пластинчатой формы характеризуются большими передними углами, меньше деформируют металл и снимают стружки с большим сечением при схеме резания с  $P_y = \text{const}$ . При шлифовании с постоянной подачей инструмента, когда толщины срезаемых стружек практически неизменны, зёрна игольчато-пластинчатой формы затрачивают меньшую эффективную мощность при резании. При этом, независимо от схемы обработки, общие затраты электроэнергии на шлифование при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам снижаются в 1,19÷1,32 раза.

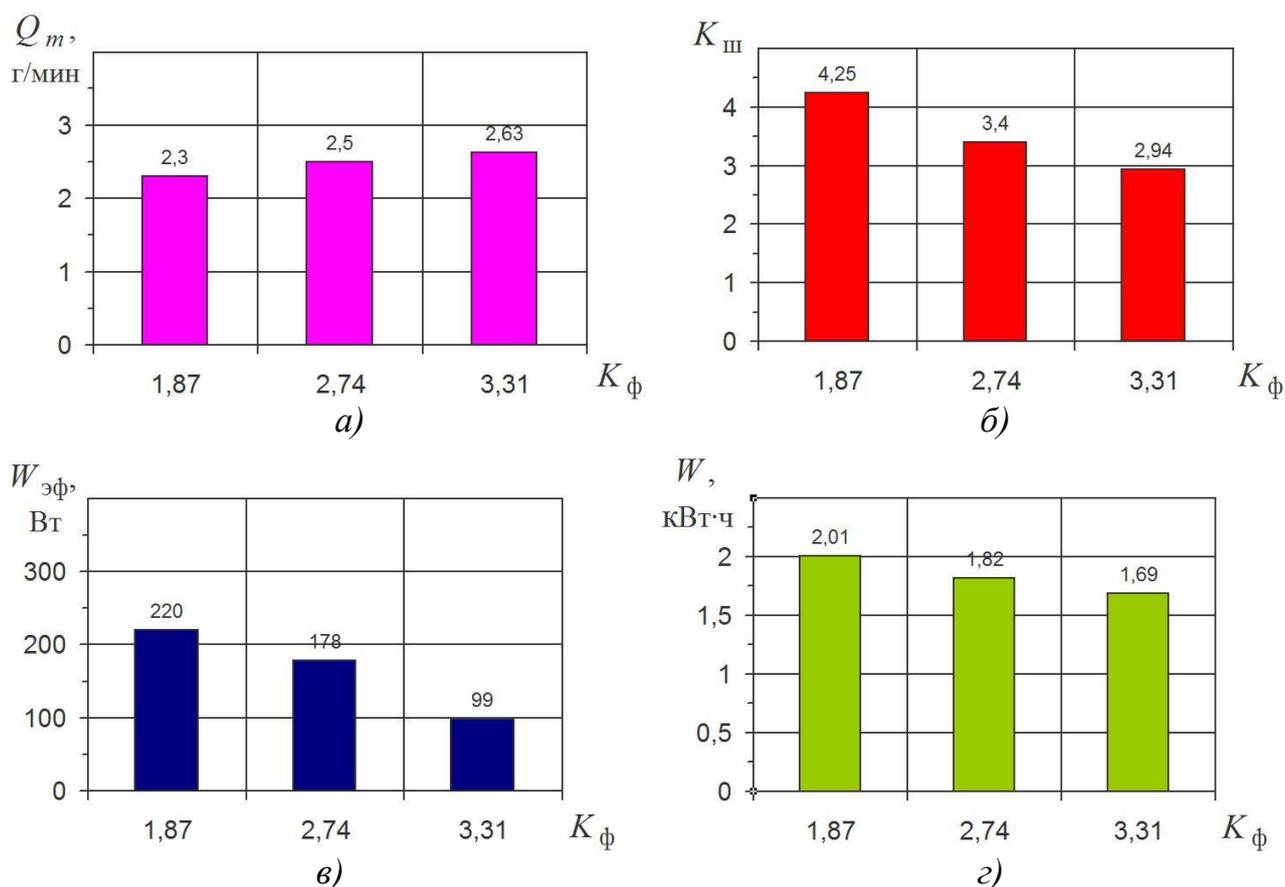


Рисунок 14 – Режущая способность (а), коэффициент шлифования (б), эффективная мощность (в), энергозатраты (г) у кругов  $230 \times 3 \times 22$  53CF54 [ $K_\phi$ ] СТЗ БУ 80 м/с с заданной формой зёрен при круглом врезном шлифовании ( $S_{\text{круга}} = \text{const}$ )

Применение кругов из зёрен игольчато-пластинчатой формы позволяет снизить энергозатраты до 11 % за счет уменьшения времени на обработку и превалирования величин мощностей холостого хода над эффективной мощностью резания при шлифовании. Также установлено, что при постоянном усилии прижатия заготовок ( $P_y = \text{const}$ ), соотношение составляющих силы резания  $P_y / P_z$  уменьшается с  $3,7 \div 5,3$  до  $2,4 \div 3$  раз при переходе от кругов с изометрическими к инструментам с игольчато-пластинчатыми зёрнами.

Испытания одних и тех же инструментов при различных схемах резания показали, что производительность обработки при схеме с постоянным усилием прижатия заготовок в  $3,5 \div 9$  раз выше, а общие энергозатраты в  $15 \div 17$  ниже, чем при круглом врезном шлифовании. Вместе с тем, при обработке с постоянной подачей кругов их стойкость ( $K_\text{ш}$ ) в  $2,1 \div 2,4$  раза выше, чем при схеме с  $P_y = \text{const}$ .

Результаты исследований теплонапряжённости процесса резания, изменения микротвёрдости и микроструктуры металла при обработке кругами с заданной формой зёрен подтвердили, что с ростом  $K_\phi$  зёрен и увеличением за счёт этого их передних углов, уменьшаются деформации обрабатываемого материала, что выражается в снижении величины и глубина зоны поверхностного упрочнения (наклепа). В результате, температуры резания снижаются. Так, применение зёрен игольчато-пластинчатой формы в шлифовальных кругах позволяет снизить температуру в зоне резания на  $20 \div 30$  °С по сравнению со стандартным инструментом.

Полученные результаты свидетельствуют также о том, что дефектного изменения структуры металла во всех случаях обработки кругами с разной формой зёрен не наблюдалось, т.е. критические температуры не достигались.

Кроме того, исследования теплонапряжённости процесса шлифования при упомянутых схемах обработки показали тождественность характера получаемых результатов, за исключением того, что при круглом врезном шлифовании практически не образуются цвета побежалости. Здесь металл каждой обрабатываемой точки заготовки при её вращении успевает существенно охладиться к моменту следующего контакта с кругом. Следовательно, такую схему отрезного шлифования, наряду с подбором геометрии зёрен, целесообразно применять там, где требуется снизить температуру нагрева металла при обработке.

Результаты исследования шероховатости поверхностей, обработанных кругами с заданной формой зёрен, показывают, что независимо от марки, зернистости абразива и режимов резания, с увеличением  $K_{\phi}$  зёрен (т.е. с ростом их передних углов) шероховатость поверхностей возрастает в 1,6÷1,8 раза (рисунок 15).

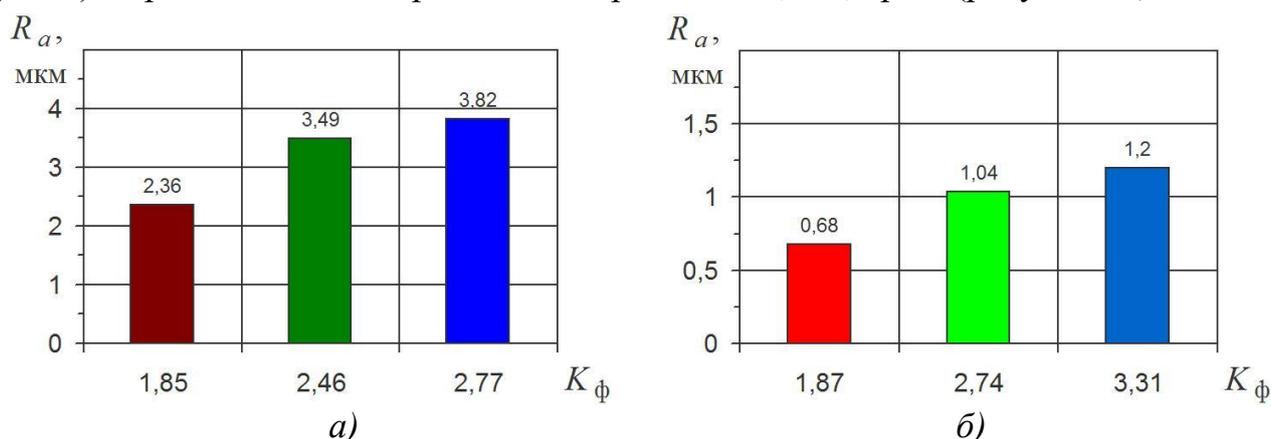


Рисунок 15 – Шероховатость поверхностей, обработанных кругами с заданной формой зёрен с характеристиками Тип 41 230×3×32 13А F30 [ $K_{\phi}$ ] Q V 50 м/с (а) и Тип 41 230×3×22 53С F54 [ $K_{\phi}$ ] Q BF 80 м/с (б)

С увеличением  $K_{\phi}$  зёрен интенсифицируется их износ. Для зёрен игольчато-пластинчатой формы в большей мере характерен износ скалыванием, объёмным разрушением и быстрым удалением из связки, что отражается на рельефе рабочей поверхности кругов и на шероховатости обработанных поверхностей. Так, установлено, что использование в инструментах игольчато-пластинчатых зёрен приводит к повышению шероховатости поверхностей на 10÷15 %, по сравнению с инструментами из обычных, не упорядоченных по форме зёрен. Применение зёрен изометрической формы, напротив, позволяет снизить шероховатость обрабатываемых поверхностей на 32÷35 % по сравнению со стандартным инструментом.

Испытания кругов с заданной формой зёрен вблизи посадочного отверстия показали, что инструменты такой конструкции позволяют увеличить их прочность и допустимую скорость работы на 13 % с 80 до 90 м/с и за счёт этого улучшить эксплуатационные показатели инструментов (рисунок 16).

По результатам испытаний установлено, что повышение рабочей скорости кругов с 80 до 90 м/с обеспечивает прирост их режущей способности на 27 %, повышение коэффициента шлифования на 11 %, снижение деформаций обрабатываемого материала и глубины зоны термического влияния на 32 %, снижение энергозатрат на обработку на 4 %, а также температуры в зоне резания на 21 °С.

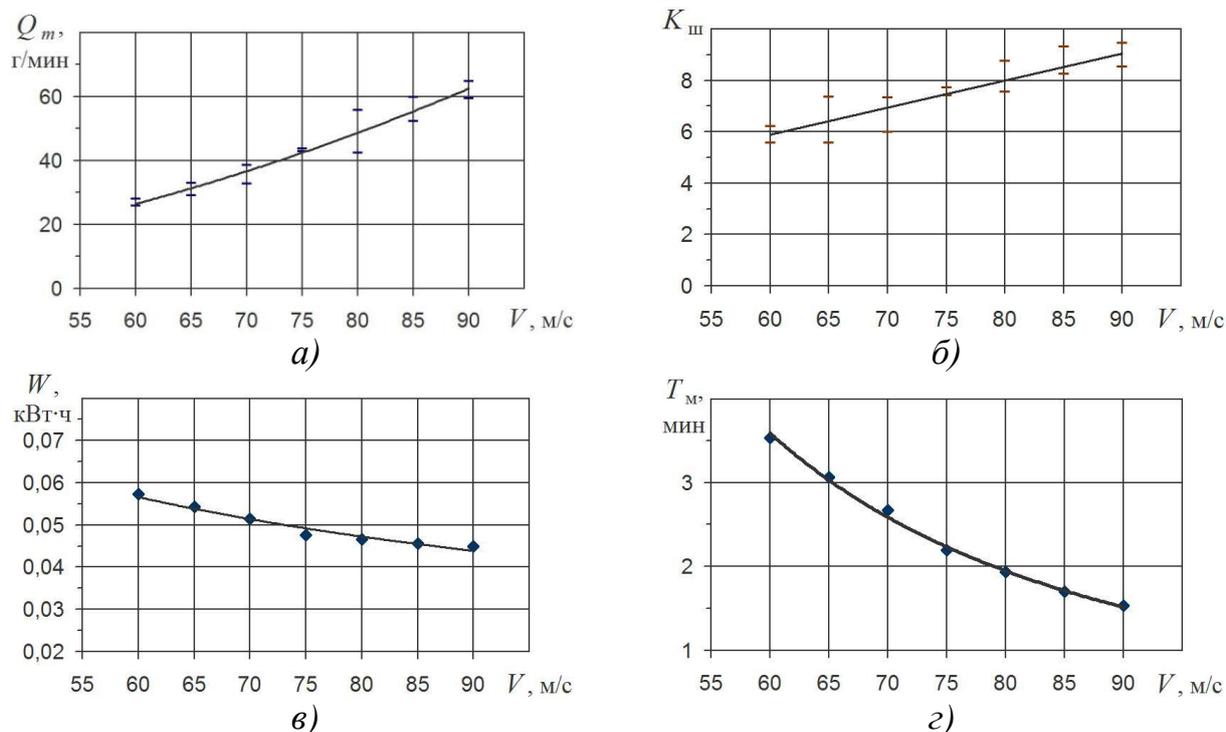


Рисунок 16 – Влияние скорости резания ( $V$ ) на режущую способность (а), коэффициент шлифования (б), энергозатраты (в) и машинное время (г) при эксплуатации шлифовальных кругов повышенной прочности

Экспериментальные данные, полученные при испытании шлифовальных кругов с заданной формой зёрен, позволили построить математические модели, отражающие наблюдаемые явления (21÷43, таблица 1).

Таблица 1

Характеристика круга и схема шлифования	Эксплуатационные показатели кругов		
	Режущая способность $Q_m$ , (г/мин)	Коэффициент шлифования $K_{ш}$	Эффективная мощность $W_{эф}$ , (Вт)
13AF30 Q В 50 м/с шлифование с $P_y = \text{const}$	$Q_m = 4,084 \cdot e^{0,451 \cdot K_{\phi}}$ ; (21)	$K_{ш} = 21,322 \cdot K_{\phi}^{-1,254}$ ; (22)	$W_{эф} = 65,088 \cdot e^{0,611 \cdot K_{\phi}}$ ; (23)
13AF30 Q В 50 м/с шлифование с $S_{\text{круга}} = \text{const}$	$Q_m = 1,668 \cdot e^{0,249 \cdot K_{\phi}}$ ; (24)	$K_{ш} = 62,713 \cdot K_{\phi}^{-1,55}$ ; (25)	$W_{эф} = 335,49 \cdot e^{-0,330 \cdot K_{\phi}}$ ; (26)
53CF54 Q ВF 80 м/с шлифование с $P_y = \text{const}$	$Q_m = 2,011 \cdot e^{0,153 \cdot K_{\phi}}$ ; (27)	$K_{ш} = 2,583 \cdot K_{\phi}^{-0,592}$ ; (28)	$W_{эф} = 392,3 \cdot e^{0,146 \cdot K_{\phi}}$ ; (29)
53CF54 Q ВF 80 м/с шлифование с $S_{\text{круга}} = \text{const}$	$Q_m = 1,960 \cdot e^{0,089 \cdot K_{\phi}}$ ; (30)	$K_{ш} = 6,058 \cdot K_{\phi}^{-0,593}$ ; (31)	$W_{эф} = 579,06 \cdot e^{-0,499 \cdot K_{\phi}}$ ; (32)
Круги с упроченной зоной из зёрен с контролируемой формой, шлифование с $P_y = \text{const}$	$Q_m = 0,005 \cdot V^{2,119}$ ; (33)	$K_{ш} = 0,105 \cdot V^{-0,431}$ ; (34)	$W_{эф} = 136,25 \cdot e^{0,018 \cdot V}$ ; (35)

Зависимости температуры металла на различном удалении от плоскости отрезки ( $l$ ) и максимальной температуры от  $K_{\phi}$  зёрен в кругах Тип 41 230×3×32 13AF30 [ $K_{\phi}$ ] Q В 50 м/с при шлифовании по схеме с  $P_y = \text{const}$ :

$$K_{\phi} \approx 1,85 : \quad t = 453,59 \cdot e^{-0,151 \cdot l}; \quad (36)$$

$$K_{\phi} \approx 2,46 : \quad t = 432,64 \cdot e^{-0,176 \cdot l}; \quad (37)$$

$$K_{\phi} \approx 2,77 : \quad t = 423,41 \cdot e^{-0,194 \cdot l}; \quad (38)$$

$$t_{max} = 499,51 - 74,536 \cdot \ln(K_{\phi}) . \quad (39)$$

Зависимости шероховатости поверхностей от  $K_{\phi}$  зёрен в шлифовальных кругах Тип 41 230×3×32 13AF30 [ $K_{\phi}$ ] Q В 50 м/с и Тип 41 230×3×22 53CF54 [ $K_{\phi}$ ] Q ВF 80 м/с при обработке по схеме с  $S_{\text{круга}} = \text{const}$ :

$$13AF30 \text{ Q В } 50 \text{ м/с:} \quad R_a = 1,145 \cdot K_{\phi}^{1,167}; \quad (40)$$

$$53CF54 \text{ Q ВF } 80 \text{ м/с:} \quad R_a = 0,353 \cdot K_{\phi}^{1,027}. \quad (41)$$

Зависимости коэффициента шлифования у кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [ $K_{\phi}$ ] Q В 50 м/с с усилием разрушения зёрен ( $P_p$ ), из которых они изготовлены, с учётом хаотичного (равновероятного) расположения зёрен в инструменте (глава 2):

$$P_y = \text{const} \quad K_{\text{ш}} = 21,322 \cdot (0,009 \cdot P_p)^{0,436}; \quad (42)$$

$$S_{\text{круга}} = \text{const} \quad K_{\text{ш}} = 62,713 \cdot (0,009 \cdot P_p)^{0,540}. \quad (43)$$

Анализ полученных моделей (21÷43) говорит о том, что марка абразива, его зернистость и схема шлифования кардинально не меняют характер воздействия формы зёрен на работоспособность кругов. Так, с ростом  $K_{\phi}$  увеличиваются напряжения в зёрнах при работе, уменьшается их прочность и стойкость (глава 2) и, как следствие, возрастает износ шлифовальных инструментов (уменьшается их  $K_{\text{ш}}$ ). Кроме того, совместный анализ результатов оценки передних углов ( $\gamma$ ) зёрен с различными  $K_{\phi}$  и эксплуатационных показателей шлифовальных кругов, изготовленных из них, показывает, что величины  $\gamma$  напрямую влияют на режущую способность, эффективную мощность и температуру шлифования кругами, а также на качество обрабатываемых поверхностей. С увеличением  $K_{\phi}$  зёрен и, как следствие, – их  $\gamma$ , деформации металла и температура резания снижаются, а режущая способность инструментов и шероховатость поверхностей возрастают. Анализ полученных экспериментальных данных и моделей (3÷4, 21÷41) позволил установить зависимости указанных эксплуатационных показателей кругов от передних углов зёрен (44÷54, таблица 2).

Таблица 2

Характеристика круга и схема шлифования	Эксплуатационные показатели кругов	
	Режущая способность $Q_m$ , (Г/мин)	Эффективная мощность $W_{\text{эф}}$ , (Вт)
13AF30 Q В 50 м/с шлифование с $P_y = \text{const}$	$Q_m = 4,084 \cdot e^{0,451e^{\left(\frac{\gamma+83,971}{25,944}\right)}};$ (44)	$W_{\text{эф}} = 65,088 \cdot e^{0,611e^{\left(\frac{\gamma+83,971}{25,944}\right)}};$ (45)
13AF30 Q В 50 м/с круглое врезное шлифование с $S_{\text{круга}} = \text{const}$	$Q_m = 1,668 \cdot e^{0,249e^{\left(\frac{\gamma+83,971}{25,944}\right)}};$ (46)	$W_{\text{эф}} = 335,49 \cdot e^{-0,330e^{\left(\frac{\gamma+83,971}{25,944}\right)}};$ (47)
53CF54 Q ВF 80 м/с шлифование с $P_y = \text{const}$	$Q_m = 2,011 \cdot e^{0,153e^{\left(\frac{\gamma+82,136}{23,966}\right)}};$ (48)	$W_{\text{эф}} = 392,3 \cdot e^{0,146e^{\left(\frac{\gamma+82,136}{23,966}\right)}};$ (49)
53CF54 Q ВF 80 м/с круглое врезное шлифование с $S_{\text{круга}} = \text{const}$	$Q_m = 1,960 \cdot e^{0,089e^{\left(\frac{\gamma+82,136}{23,966}\right)}};$ (50)	$W_{\text{эф}} = 579,06 \cdot e^{-0,499e^{\left(\frac{\gamma+82,136}{23,966}\right)}}.$ (51)

Зависимость максимальных температур от переднего угла зёрен при работе шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [ $K_{\phi}$ ] Q В 50 м/с по схеме с  $P_y = \text{const}$ :

$$t_{\max} = 258,265 - 2,873 \cdot \gamma . \quad (52)$$

Зависимости шероховатости обработанных поверхностей от передних углов зёрен различной формы, применённых в кругах Тип 41 230×3×32 13AF30 [ $K_{\phi}$ ] Q B 50 м/с и Тип 41 230×3×22 53CF54 [ $K_{\phi}$ ] Q BF 80 м/с (обработка по схеме с  $S_{\text{круга}} = \text{const}$ ):

$$13AF30 \text{ Q B } 50 \text{ м/с: } R_a = 1,145 \cdot e^{1,1668 \cdot \left( \frac{\gamma + 83,971}{25,944} \right)} ; \quad (53)$$

$$53CF54 \text{ Q BF } 80 \text{ м/с: } R_a = 0,353 \cdot e^{1,0269 \cdot \left( \frac{\gamma + 82,136}{23,966} \right)} . \quad (54)$$

В целом, проведённые испытания и анализ их результатов показали, что эксплуатационные показатели шлифовальных кругов могут быть существенно улучшены путём задания определенной формы используемых абразивных зёрен.

**В шестой главе** представлены результаты исследований эксплуатационных показателей опытных шлифовальных кругов с ориентированными зёрнами. Для исследований использовались экспериментальные круги, изготовленные согласно разработанной технологии (Пат. РФ на способ № 2369474, глава 3). В процессе изготовления данных кругов зёрна целенаправленно ориентировали электростатическим полем в требуемом направлении. Для количественной оценки ориентации зёрен в теле круга использован угол наклона их наибольших осей ( $\Theta$ ) по отношению к плоскости резания. Испытывались три конструктивные разновидности кругов:

- с радиальной ориентацией зёрен – когда зёрна осями располагались вдоль линий от центра к периферии круга, т.е. нормально к плоскости резания ( $\Theta = 90^\circ$ );
- с тангенциальной ориентацией зёрен, при которой наибольшие оси зёрен располагались параллельно плоскости резания ( $\Theta = 0^\circ$ );
- обычные круги без ориентации зёрен ( $\Theta = \text{var}$ ), изготовленные из той же абразивной смеси, на том же оборудовании, за один технологический цикл.

Радиальная и тангенциальная ориентация зёрен были выбраны как противоположные и наиболее показательные варианты их расположения.

Для изготовления опытных кругов всех разновидностей использовались зёрна нормального электрокорунда 13AF46. Методом количественной оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве установлено, что средний коэффициент формы зёрен во фракции составил  $K_{\phi} \approx 2,4$ .

Изготавливались круги как с упрочняющими, так и без упрочняющих элементов: Тип 41 230×4×32 13AF46 [ $\Theta$ ] S BF 80 м/с и Тип 41 230×3×32 13AF46 [ $\Theta$ ] S B 50 м/с. Испытания кругов проводились при рабочих скоростях 80 и 50 м/с соответственно. Методики испытаний и испытательное оборудование аналогичны тому, что использовалось при исследовании эксплуатационных показателей кругов с заданной формой зёрен (глава 5). Испытания проводились как по схеме резания с постоянным усилием прижатия заготовок ( $P_y = \text{const}$ ), так и по схеме круглого врезного шлифования ( $S_{\text{круга}} = \text{const}$ ) на предварительно подобранных рациональных режимах шлифования, без применения охлаждения. При проведении исследований использовались заготовки из сталей трёх групп – конструкционной, коррозионно-стойкой и инструментальной: Сталь 10, 12X18H10T, ШХ15 (60 HRC).

Результаты оценки режущей способности, коэффициента шлифования и эффективной мощности резания при эксплуатации кругов с ориентированными зёрнами и характеристикой Тип 41 230×4×32 13AF46 [ $\Theta$ ] S BF 80 м/с представлены в виде диаграмм на рисунках 17 и 18, а результаты исследований шероховатости обработанных поверхностей – на рисунке 19.

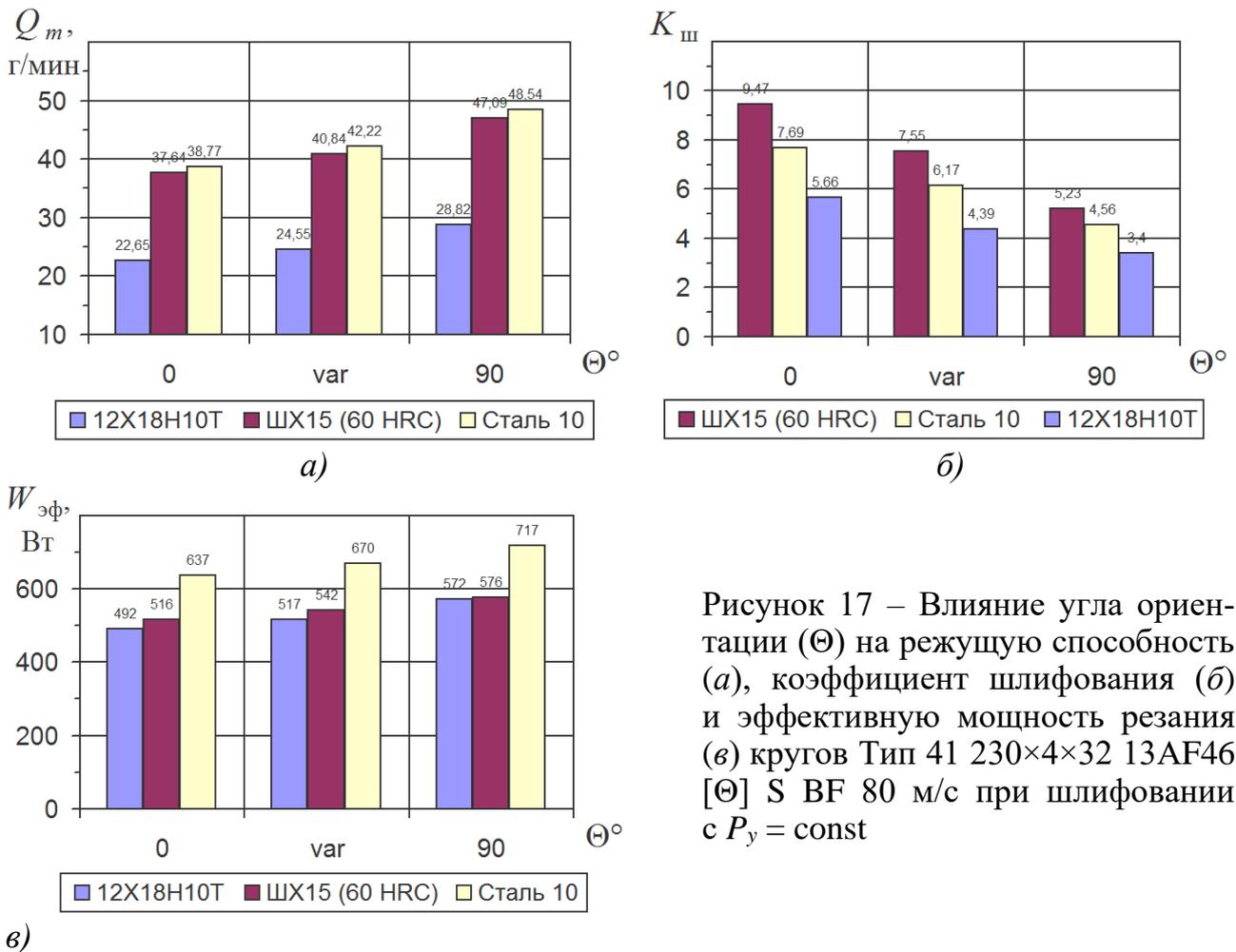


Рисунок 17 – Влияние угла ориентации ( $\Theta$ ) на режущую способность (а), коэффициент шлифования (б) и эффективную мощность резания (в) кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с при шлифовании с  $P_y = \text{const}$

Результаты исследований показывают, что при переходе от тангенциальной ( $\Theta = 0^\circ$ ) к радиальной ориентации зёрен ( $\Theta = 90^\circ$ ) режущая способность кругов возрастает в  $1,1 \div 1,27$  раза, а коэффициент шлифования снижается в  $1,4 \div 1,8$  раза (в зависимости от наличия упрочняющих элементов, схемы, режимов резания и обрабатываемого материала). При этом, режущая способность кругов при  $\Theta = 90^\circ$  на  $7 \div 17$  % выше, чем у обычных кругов с неориентированными зёрнами ( $\Theta = \text{var}$ ), а  $K_{ш}$  у кругов с  $\Theta = 0^\circ$  на  $21 \div 30$  % выше, чем у стандартных инструментов. Повышенная режущая способность кругов с радиальной ориентацией зёрен объясняется большими передними углами у таких зёрен и большим числом режущих кромок на рабочей поверхности инструмента. Снижение режущей способности у инструментов с тангенциальной ориентацией зёрен объясняется уменьшением передних углов зёрен и ростом деформаций обрабатываемого материала. Установлено также, что схема шлифования с  $P_y = \text{const}$  в  $9 \div 15$  раз производительнее схемы с  $S_{\text{круга}} = \text{const}$ .

Причиной снижения  $K_{ш}$  отрезных кругов при переходе от тангенциальной ( $\Theta = 0^\circ$ ) к радиальной ориентации зёрен ( $\Theta = 90^\circ$ ) является повышение уровня напряжений в зёрнах и, как следствие, интенсификация их износа.

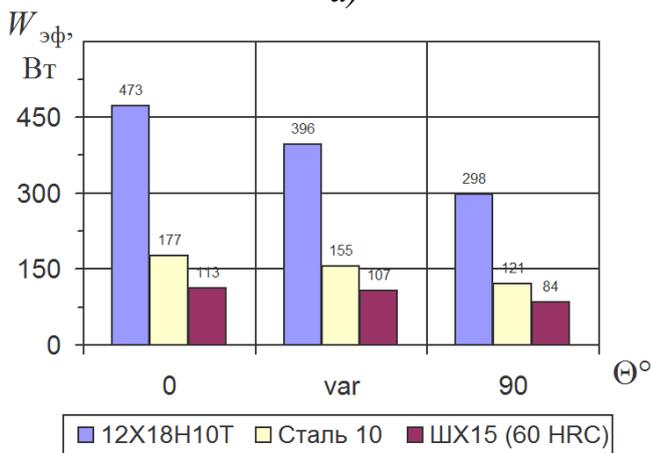
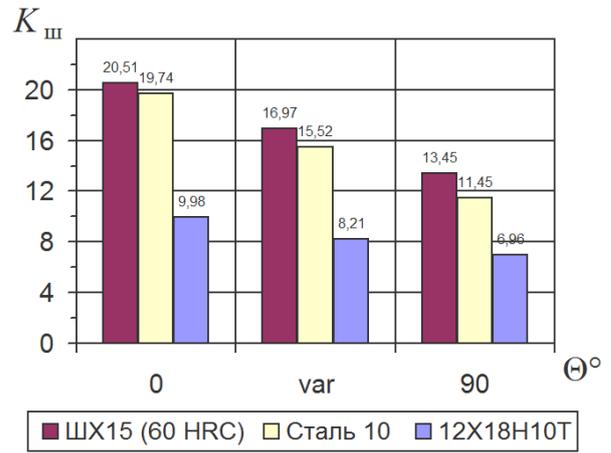
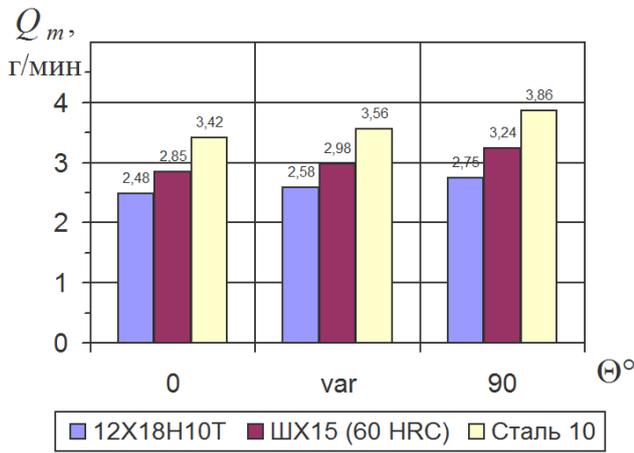


Рисунок 18 – Влияние угла ориентации ( $\Theta$ ) на режущую способность (а), коэффициент шлифования (б) и эффективную мощность резания (в) кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с при круглом врезном шлифовании

При этом, влияние ориентации зёрен на коэффициент шлифования кругов более значительно, чем на их режущую способность. Также исследования показывают, что при круглом врезном шлифовании  $K_{ш}$  кругов  $1,8 \div 2,6$  раза выше, чем при резании с  $P_y = const$ .

Установлено также, что при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен в кругах при схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок эффективная мощность резания возрастает в  $1,12 \div 1,55$  раза, а при схеме круглого врезного шлифования – снижается в  $1,35 \div 1,59$  раза, что, как и при испытании инструментов с различной формой зёрен (глава 5), объясняется увеличением передних углов зёрен (в данном случае – за счёт их радиальной ориентации) и особенностями схем шлифования. При этом, при схеме шлифования с  $P_y = const$  соотношение составляющих силы резания  $P_y / P_z$  уменьшается при переходе от кругов с тангенциальной ориентацией зёрен к инструментам с радиальной ориентацией с  $4 \div 5,2$  до  $3 \div 4,5$  раз.

По результатам исследований установлено также, что увеличение передних углов зёрен посредством их целенаправленной ориентации, независимо от схемы и режимов шлифования, а также от обрабатываемого материала, позволяет за счёт повышения режущей способности инструментов и уменьшения времени обработки, уменьшить общие энергозатраты.

Рассмотрение схемы нагружения абразивных зёрен от действия силы резания  $P$  и её составляющих  $P_y$  и  $P_z$  показывает, что наиболее рациональными с точки зрения прочности зёрен являются два варианта их ориентирования: тангенциальная ориентация ( $\Theta = 0^\circ$ ) и ориентация зёрен наибольшими осями по направлению действия силы резания  $P$ , когда зёрна испытывают преимущественно сжимающие

нагрузки. Вариант ориентации зёрен по направлению действия силы резания также более эффективен по сравнению с радиальным расположением зёрен с точки зрения увеличения передних углов режущих микроклиньев, снижения деформаций и температур обрабатываемых заготовок и повышения режущей способности инструментов. Установлено, что при отрезном шлифовании заготовок из стали 10 рациональный угол ориентации зёрен в кругах в соответствии с направлением действия силы резания находится в диапазоне  $\Theta = 72^\circ \div 78^\circ$  (в среднем  $\Theta = 75^\circ$ ), а при шлифовании заготовок из стали 12X18H10T и ШХ15 (60 HRC) рациональный угол ориентации зёрен составляет  $\Theta = 77^\circ \div 79^\circ$  (в среднем  $\Theta = 78^\circ$ ).

Результаты исследования шероховатости поверхностей, обработанных кругами с ориентированными зёрнами (рисунок 19), показывают, что, независимо от марки шлифуемого материала, увеличение или уменьшение передних углов зёрен в кругах посредством их целенаправленной ориентации сопровождается, соответственно, увеличением или снижением шероховатости.

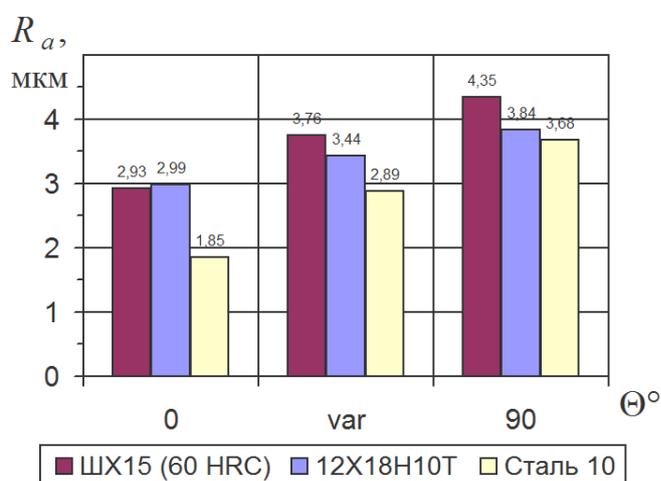


Рисунок 19 – Зависимость шероховатости обработанных поверхностей ( $R_a$ ) от угла ориентации зёрен ( $\Theta$ ) после обработки по схеме круглого врезного шлифования кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [ $\Theta$ ] S BF 80 м/с

Так, при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен происходит увеличение их передних углов (глава 2) и снижение деформаций обрабатываемого материала, в результате чего шероховатость обрабатываемых поверхностей возрастает в  $1,3 \div 2$  раза в зависимости от материала заготовок.

Дополнительное влияние на шероховатость оказывает характер износа зёрен при различных углах ориентации. Для тангенциально ориентированных зёрен характерен износ с образованием площадок, а для радиально ориентированных зёрен – износ скалыванием, объёмным разрушением и быстрым вырывом из связки.

Вследствие изложенного использование шлифовальных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен ( $\Theta = 0^\circ$ ) позволяет снизить шероховатость поверхностей на  $13 \div 36$  % по сравнению с применением инструментов с неориентированными зёрнами ( $\Theta = \text{var}$ ). Использование кругов с радиальной ориентацией зёрен ( $\Theta = 90^\circ$ ), напротив, приводит к повышению шероховатости поверхностей на  $12 \div 27$  %.

Совместный анализ результатов испытаний кругов (рисунки 17 и 18) и зависимостей передних углов и напряжений в зёрнах от углов их ориентации и коэффициентов формы (глава 2, (10)–(11)) позволили построить математические модели, отражающие взаимосвязь  $Q_m$  и  $W_{\text{эф}}$  шлифовальных кругов с передними углами зёрен, а также  $K_m$  инструментов с величинами максимальных напряжений в зёрнах. При обработке заготовок из стали 10 кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [ $\Theta$ ] S BF 80 м/с по схеме с  $P_y = \text{const}$  эти зависимости имеют следующий вид:

$$Q_m = 51,843 \cdot e^{0,005 \cdot \gamma}; \quad (55)$$

$$W_{\text{эф}} = 744,91 \cdot e^{0,003 \cdot \gamma}; \quad (56)$$

$$K_{\text{ш}} = 8,994 - 0,023 \cdot \sigma_{\text{max}}. \quad (57)$$

Они показывают, что с увеличением передних углов зёрен режущая способность кругов и эффективная мощность резания возрастают. Увеличение максимальных напряжений в зёрнах приводит к снижению их стойкости и, как следствие, к уменьшению коэффициента шлифования инструментов.

Ориентация зёрен также оказывает существенное влияние на теплонапряжённость процесса шлифования. При обработке заготовок из различных марок сталей кругами с радиальной ориентацией зёрен температура в зоне резания снижается на 20÷70 °С, а глубина зоны термического влияния – до 1,4 раза, по сравнению с кругами без ориентации зёрен (шлифование с  $P_y = \text{const}$ ). Построенные графики температуры металла ( $t$ ) на различном удалении от плоскости обработки ( $l$ ) в зависимости от ориентации зёрен ( $\Theta$ ) в кругах позволили получить математические модели, отражающие эти явления (таблица 3).

Таблица 3

Марка стали	Угол ориентации зёрен ( $\Theta$ )	Математическая модель
Сталь 10	0°	$t = 481,61 \cdot e^{-0,161 \cdot l}; \quad (58)$
	var	$t = 465,12 \cdot e^{-0,175 \cdot l}; \quad (59)$
	90°	$t = 434,33 \cdot e^{-0,206 \cdot l}; \quad (60)$
12X18H10T	0°	$t = 901,89 \cdot e^{-0,270 \cdot l}; \quad (61)$
	var	$t = 871,76 \cdot e^{-0,323 \cdot l}; \quad (62)$
	90°	$t = 804,37 \cdot e^{-0,392 \cdot l}; \quad (63)$
ШХ 15 (60 HRC)	0°	$t = 484,67 \cdot e^{-0,199 \cdot l}; \quad (64)$
	var	$t = 469,40 \cdot e^{-0,224 \cdot l}; \quad (65)$
	90°	$t = 444,47 \cdot e^{-0,277 \cdot l}. \quad (66)$

Исследование микротвёрдости и микроструктуры материала заготовок, обработанных кругами с ориентированными зёрнами, коррелируют и подтверждают результаты исследований теплонапряжённости процесса шлифования.

Кроме того, совместный анализ полученных результатов (таблица 3) и установленных зависимостей передних углов зёрен от  $\Theta$  и  $K_{\text{ф}}$  (глава 2) позволил получить модели, отражающие взаимосвязь максимальных температур от передних углов зёрен при обработке заготовок из сталей различных марок:

$$\text{Сталь 10} \quad t_{\text{max}} = 421,39 - 1,120 \cdot \gamma; \quad (67)$$

$$12X18H10T \quad t_{\text{max}} = 780,10 - 2,279 \cdot \gamma; \quad (68)$$

$$\text{ШХ 15 (60 HRC)} \quad t_{\text{max}} = 432,68 - 0,963 \cdot \gamma. \quad (69)$$

Получены также зависимости шероховатости обработанных поверхностей ( $R_a$ ) от передних углов ориентированных зёрен:

$$\text{Сталь 10} \quad R_a = 4,904 \cdot e^{0,018 \cdot \gamma}; \quad (70)$$

$$12X18H10T \quad R_a = 4,092 \cdot e^{0,006 \cdot \gamma}; \quad (71)$$

$$\text{ШХ 15 (60 HRC)} \quad R_a = 5,018 \cdot e^{0,010 \cdot \gamma}. \quad (72)$$

Характер полученных моделей, а также результаты исследований микротвёрдости и микроструктуры обработанных заготовок говорят о том, что, увеличивая передние углы зёрен в инструменте путём их целенаправленного ориентирования можно снизить температуру резания и деформации обрабатываемого металла, а также повысить производительность шлифования. Уменьшение передних углов зёрен позволяет снизить шероховатость обработанных поверхностей.

Таким образом, показано, что управление ориентацией зёрен, наряду с упорядочением их формы, открывает перспективу повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов. При этом, на этапе проектирования инструментов, целесообразно использовать теоретические выкладки и методики исследований, изложенные в главе 2. Их актуальность подтверждается тем, что результаты оценки геометрических, прочностных и стойкостных свойств зёрен с учётом их формы и ориентации коррелируют с исследованиями эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен. В качестве примера, демонстрирующего пригодность предложенного подхода для проектирования инструментов с заданной геометрией зёрен, в таблице 4 представлены величины передних углов и максимальных напряжений в зёрнах, рассчитанные в соответствии с моделями (10)÷(11) для случаев обработки заготовок из стали 10 кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с с разной ориентацией зёрен.

Таблица 4

Угол ориентации зёрен (Θ)	Средние передние углы зёрен (γ)	Максимальные напряжения в зёрнах (σ <sub>max</sub> , МПа)
0°	-56,3°	51,6
var	-28,5°	147,6
90°	-19,5°	174,7
67,5°	-2,6°	89,5
34°	+15,5°	143,4

Совместный анализ результатов исследований геометрических, прочностных и стойкостных показателей зёрен в зависимости от их формы и ориентации, а также эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен позволил разработать рекомендации по повышению эффективности различных видов шлифования (таблица 5).

Таблица 5 – Рекомендации по повышению эффективности шлифования за счёт управления формой и ориентацией зёрен.

Вид абразивной обработки	Управление формой и ориентацией зёрен		Достигаемый эффект
	$K_{\phi}$	Θ	
1	2	3	4
Скоростное шлифование	Увеличение $K_{\phi}$ зёрен в зоне посадочного отверстия кругов на полимерных связках	Тангенциальная ориентация зёрен	Упорядочение внутреннего строения и предотвращение появления и развития трещин, вызывающих разрыв кругов, повышение скорости шлифования
Силовое и обдирочное шлифование	Уменьшение $K_{\phi}$ зёрен	Тангенциальная ориентация зёрен	Повышение прочности зёрен и стойкости кругов, изготовленных из них; эксплуатация инструментов при повышенных нагрузках
Отрезное и глубинное шлифование	Увеличение $K_{\phi}$ зёрен	Радиальная или наклонная ориентация зёрен	Повышение производительности и снижение теплонапряжённости шлифования

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4
Чистовое шлифование	Уменьшение $K_{\phi}$ зёрен	Тангенциальная ориентация зёрен	Уменьшение передних углов зёрен и снижение за счёт этого шероховатости обработанных поверхностей, снижение износа инструментов
Заточка инструментов и шлифование с низкими температурами	Увеличение $K_{\phi}$ зёрен	Радиальная или наклонная ориентация зёрен	Снижение температуры резания, повышение режущей способности инструментов

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В диссертационной работе на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на повышение производительности шлифования, стойкости абразивных инструментов и качества обрабатываемых поверхностей, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие отечественного машиностроения. Указанная проблема решена посредством разработки и создания абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен.

2. Разработана методология создания абразивных инструментов с заданной формой и ориентацией зёрен, базирующаяся на учёте влияния и научно обоснованном выборе этих параметров, позволяющая упорядочивать внутреннее строение таких инструментов и управлять геометрией их зёрен, что обеспечивает повышение эксплуатационных возможностей инструментов и повышение эффективности операций шлифования по сравнению с использованием стандартного абразивного инструмента с неупорядоченной формой и ориентацией зёрен: производительности шлифования в 1,2–1,3 раза, стойкости абразивных инструментов в 1,2–1,4 раза их прочности и рабочей скорости в 1,1–1,2 раза и качества обрабатываемых поверхностей – снижение шероховатости в 1,1–1,4 раза и глубины зоны термического влияния в 1,3–1,4 раза;

3. Для получения зёрен с заданной формой, необходимых для изготовления абразивных кругов, выбран метод вибрационного рассева исходной массы абразива на ряд фракций, а для ориентации зёрен в теле инструментов разработан способ (Пат. РФ № 2369474) в основу которого положено воздействие электростатического эффекта.

4. Предложен и реализован способ количественной идентификация встречающихся разновидностей формы зёрен в трёхмерном пространстве через коэффициент формы ( $K_{\phi}$ ), равный отношению диаметров описанных и вписанных в контур зерна сфер, на программное обеспечение к которому получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2006613051. Для оценки ориентации зёрен в теле инструмента введён параметр «угол ориентации зёрен  $\Theta$ », измеряемый между наибольшей осью зерна и плоскостью резания.

5. Разработаны способы и программное обеспечение по установлению взаимосвязи формы зёрен с площадью их поверхности и количеством в единице объема (свидетельство на ПрЭВМ № 2007612468), посредством которых установлено,

что с увеличением  $K_{\phi}$  зёрен возрастает площадь их поверхности и количество зёрен в единице насыпного объёма и объёма инструмента.

6. Разработан способ и программное обеспечение по установлению величин передних углов зёрен в зависимости от их формы (свидетельство на ПрЭВМ № 2008614244), с помощью которых установлено, что с увеличением  $K_{\phi}$  произвольно ориентированных зёрен увеличиваются их передние углы.

7. Разработаны способы и программный комплекс в составе четырёх программ для ЭВМ для оценки передних углов зёрен и напряжений в них в зависимости от формы и ориентации в инструменте (свидетельства на ПрЭВМ № 2011614263, № 2011615114, № 2011616506, № 2015619877), которые позволили установить характер совместного влияния формы и ориентации зёрен на передние углы и напряжения в них при работе. Дано математическое описание этого влияния посредством тригонометрических рядов с периодом  $\pi$  и установлено, что:

- с увеличением коэффициента формы шлифовальных зёрен в диапазоне углов ориентации  $\Theta = 10^{\circ} \div 125^{\circ}$  их передние углы возрастают, а для тангенциально ориентированных зёрен ( $\Theta = 0^{\circ}$  ( $180^{\circ}$ )) и зёрен с близкими направлениями ориентации ( $\Theta = 135^{\circ} \div 180^{\circ}$ ) наблюдается обратная тенденция;

- передние углы зёрен достигают максимальных значений при их ориентации вершинами навстречу силе резания ( $\Theta = 22,5^{\circ} \div 90^{\circ}$ , в особенности при  $\Theta = 22,5^{\circ} \div 45^{\circ}$ ); минимальные значения передних углов достигаются при тангенциальной ориентации зёрен ( $\Theta = 0^{\circ}$  ( $180^{\circ}$ )) и ориентации вершинами по направлению  $P_z$  ( $100^{\circ} \div 180^{\circ}$ );

- максимальные напряжения в зёрнах возрастают с увеличением их коэффициентов формы при всех углах ориентации, достигают минимальных значений при наименьших  $K_{\phi}$ , тангенциальной ориентации зёрен и ориентации соосно с вектором силы резания.

8. На основе разработанного способа и сконструированной установки для оценки прочности свободных зёрен различных марок и зернистостей в зависимости от формы и ориентации, установлено, что наибольшую прочность имеют зёрна с малыми коэффициентами формы, тангенциально ориентированные зёрна и зёрна, расположенные соосно с вектором действующей нагрузки. Чем больше угол рассогласования между наибольшей осью зерна и воздействующей силой, тем меньше его прочность. Разница в прочности зёрен с различной ориентацией тем более заметна, чем больший  $K_{\phi}$  они имеют.

9. Разработан способ и программное обеспечение для оценки взаимосвязи износа зёрен с их формой и ориентацией в инструменте (свидетельство на ПрЭВМ № 2008610817). Установлено, что стойкость зёрен уменьшается с ростом коэффициента формы при всех углах ориентации. Наибольшей стойкостью обладают тангенциально ориентированные зёрна. Стойкости радиально ориентированных зёрен и зёрен, ориентированных вершинами навстречу силе резания, меньше и имеют близкие значения. Наименьшую стойкость имеют зёрна, ориентированные по направлению действия составляющей силы резания  $P_z$ .

10. Разработаны способы и технологическая оснастка для изготовления шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен (патенты РФ № 2349446, № 2369474), а также сконструированы стенды, установки и приспособ-

собления для проведения комплексных испытаний новых конструкций кругов на прочность, режущую способность, износ, мощность резания.

11. Исследована эффективность ориентации зёрен в опытных шлифовальных кругах. Установлено, что порядка 60 % зёрен сориентированы с отклонением от заданного направления ориентации не более 15°. Для оценки эффективности ориентирования зёрен разработана методика и программное обеспечение (свидетельство на ПрЭВМ № 2017663831).

12. Динамические и статические испытания, согласно разработанного способа (Пат. РФ № 2292032), шлифовальных кругов с заданной формой зёрен показали, что, увеличивая  $K_f$  зёрен в кругах (на бакелитовой связке) в целом, или локально, в зоне посадочного отверстия (Пат. РФ № 2349446), можно повысить их прочность и, как следствие, допустимую скорость шлифования, что повышает режущую способность и коэффициент шлифования таких инструментов и снижает температуру при резании.

13. По результатам исследований и испытаний шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен также установлено, что:

- повышение прочности и рабочей скорости шлифовальных кругов на 13 % за счет упорядочения формы зёрен в зоне у посадочного отверстия обеспечивает повышение режущей способности инструмента в 1,3 раза, стойкости инструмента в 1,1 раза, снижает глубину зоны термического влияния в 1,3 раза, температуру в зоне резания на 21 °С, и энергозатраты на обработку на 4 %;

- для обеспечения высокой стойкости шлифовальных кругов и низкой шероховатости обрабатываемых поверхностей целесообразно использовать в режущей части инструментов изометрические зёрна с минимальными значениями  $K_f$  и ориентировать их в тангенциальном направлении ( $\Theta = 0^\circ$ );

- применение в шлифовальных кругах зёрен изометрической формы приводит к повышению стойкости инструмента в 1,3–1,4 раза и снижению шероховатости обрабатываемых поверхностей в 1,3–1,4 раза;

- тангенциальное ориентирование зёрен в шлифовальных кругах обеспечивает повышение стойкости инструмента в 1,2–1,3 раза и снижение шероховатости обрабатываемых поверхностей в 1,1–1,4 раза;

- для обеспечения повышенной режущей способности шлифовальных кругов, снижения температуры шлифования и глубины зоны термического влияния при обработке, снижения энергозатрат целесообразно использовать в режущей части инструментов зёрна игольчато-пластинчатой формы с максимальными значениями  $K_f$  и ориентировать их в радиальном направлении ( $\Theta = 90^\circ$ );

- применение в шлифовальных кругах зёрен игольчато-пластинчатой формы приводит к повышению режущей способности инструмента до 1,2 раза, к снижению температуры в зоне резания на 20–30 °С и снижению энергозатрат на обработку в 1,1 раза;

- радиальное ориентирование зёрен в шлифовальных кругах обеспечивает повышение режущей способности инструмента до 1,2 раза, снижение температуры в зоне резания на 20–70 °С и снижение глубины зоны термического влияния до 1,4 раза;

– указанные эффекты могут быть усилены за счет совместного упорядочения формы и ориентации зёрен в инструментах и применения других вариантов ориентирования зёрен;

– использование для изготовления кругов зёрен с большими  $K_{\phi}$ , и зёрен, ориентированных в радиальном ( $\Theta = 90^\circ$ ) или близком к нему направлениях ( $\Theta = 22,5^\circ \div 90^\circ$ , в особенности, при  $\Theta = 22,5^\circ \div 45^\circ$ ), обеспечивает максимальные значения передних углов у зёрен, что позволяет значительно повысить режущую способность инструментов, уменьшить деформации металла, снизить температуру шлифования и устранить или уменьшить риск появления прижогов на обрабатываемых деталях;

– ориентация зёрен соосно направлению действия силы резания позволяет изготавливать шлифовальные инструменты одновременно с высокой режущей способностью и стойкостью, для чего для достижения максимального эффекта целесообразно предварительно определить угол действия силы резания и обеспечить соответствующий угол ориентации зёрен в инструменте;

– исходя из того, что соотношение составляющих силы резания  $P_y$  и  $P_z$  для различных операций шлифования, как правило, варьируется в интервале от 1,2:1 до 10:1, то рациональные углы ориентации зёрен соосно силе резания находятся в диапазоне  $\Theta = 50^\circ \div 84^\circ$ ;

– при отрезном шлифовании заготовок из стали 10 рациональный угол ориентации зёрен в кругах в соответствии с направлением действия силы резания находится в диапазоне  $\Theta = 72^\circ \div 78^\circ$  (в среднем  $\Theta = 75^\circ$ ), а при шлифовании заготовок из стали 12X18H10T и ШХ15 (60 HRC) рациональный угол ориентации зёрен составляет  $\Theta = 77^\circ \div 79^\circ$  (в среднем  $\Theta = 78^\circ$ ).

– для новых конструкций кругов целесообразно расширить их характеристику, введя дополнительно коэффициент формы зёрен [ $K_{\phi}$ ] и угол их ориентации [ $\Theta$ ], а на самих кругах следует указывать (стрелкой) рекомендуемое направление вращения для обеспечения наклона зёрен навстречу силе резания.

14. По результатам исследований геометрических, прочностных и стойкостных показателей зёрен, а также комплексных испытаний шлифовальных кругов с заданной формой и ориентацией зёрен получены математические модели, отражающие наблюдаемые явления и позволяющие на этапе проектирования инструментов прогнозировать и обеспечивать рациональное сочетание их эксплуатационных показателей под конкретные условия и задачи обработки за счёт управления формой и ориентации зёрен. Разработаны рекомендации по повышению эффективности различных операций шлифования за счёт управления геометрией зёрен.

15. Шлифовальные круги с заданной формой и ориентацией зёрен испытаны в лабораторных и производственных условиях, результаты которых подтвердили повышенные эксплуатационные характеристики по сравнению со стандартными инструментами. Новые шлифовальные круги внедрены на ряде промышленных предприятий (ООО ИК «Спецкомплектация» (г. Кемерово), ООО «Завод электро-технической аппаратуры» (г. Кемерово), ООО «Восток-ПолимерХим» (г. Кемерово), авторемонтных мастерских компании «Кузбассразрезуголь» (г. Белово), ООО «Агромаш» (г. Кемерово)), а технологии их изготовления готовы к широкому промышленному применению.

## Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

### *Монографии*

1. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов : монография. – Москва : Машиностроение, 2009 – 178 с.
2. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных показателей шлифовальных кругов путем упорядочения геометрии используемых абразивных зерен : монография. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 230 с.

### *Работы в журналах перечня ВАК*

3. Коротков, В. А. Стенд для испытаний отрезных шлифовальных кругов на механическую прочность // *Обработка металлов*. – 2006. – № 2. – С. 10–11.
4. Петрушин, С. И. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов / С. И. Петрушин, В. А. Коротков // *Обработка металлов*. – 2005. – № 4. – С. 16–18.
5. Коротков, В. А. Износ шлифовальных зёрен с разной формой // *Обработка металлов*. – 2007. – № 1. – С. 30–32.
6. Коротков, В. А. Оценка формы и площади поверхности шлифовальных зёрен в трехмерном пространстве // *Обработка металлов*. – 2007. – № 2. – С. 27–29.
7. Коротков, В. А. Тепловые явления при шлифовании отрезными кругами с контролируемой формой абразивных зёрен // *Обработка металлов*. – 2007. – № 4, – С. 28–29.
8. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных характеристик отрезных шлифовальных кругов // *Главный механик*. – 2009. – № 7. – С. 11–17.
9. Коротков, В. А. Отрезные шлифовальные круги из зёрен с контролируемой формой и ориентацией // *Обработка металлов*. – 2010. – № 1. – С. 29–30.
10. Коротков, В. А. Исследование геометрических и прочностных характеристик ориентированных шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // *Обработка металлов*. – 2012. – № 3. – С. 42–48. WOS:00436682100011
11. Коротков, В. А. Реализация способа ротационно-абразивной отрезки на токарных станках в условиях мелкосерийного производства / В. А. Коротков, А. А. Дурсенев, К. Л. Квасов // *Вестник КузГТУ*. – 2014. – № 2. – С. 61–67.
12. Коротков, В. А. Геометрия и напряжённое состояние ориентированных шлифовальных зёрен с контролируемой формой / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // *Обработка металлов*. – 2014. – № 2. – С. 62–77. WOS:000436686500008
13. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов с ориентированными шлифовальными зёрнами // *Вестник КузГТУ*. – 2014. – № 4. – С. 61–65.
14. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей моделей отрезных шлифовальных кругов из различных типов полимерных связующих / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков, Н. Е. Бобков // *Вестник КузГТУ*. – 2014. – № 4. – С. 66–69.
15. Коротков, В. А. Взаимосвязь геометрии и напряжений в ориентированных шлифовальных зёрнах / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // *Справочник. Инженерный журнал*. – 2014. – № 8. – С. 46–49, 57.
16. Коротков, В. А. Лабораторное оснащение и методика количественной оценки формы зёрен / В. А. Коротков, Д. В. Видин, А. В. Рыжикова // *Вестник КузГТУ*. – 2015. – № 3. – С. 71–76.
17. Коротков, В. А. Исследование влияния ориентации абразивных зёрен на эксплуатационные показатели шлифовальных кругов при реализации круглого врезного шлифования // *Вестник КузГТУ*. – 2015. – № 6. – С. 90–96.

18. Коротков, В. А. Влияние формы и ориентации зёрен на эксплуатационные показатели шлифовальных кругов при плоском шлифовании / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Вестник КузГТУ, 2018, №3, С. 56–61. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-3-56-61
19. Коротков, В. А. Экспериментальная оценка возможности применения цемента в качестве связующего в шлифовальных кругах / В. А. Коротков, В. Г. Баштанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2021. – № 1 (153). – С. 3–8. DOI: 10.26730/1816-4528-2021-1-3-8
20. Коротков, А. Н. Сравнительный анализ применения полого сферокорунда в качестве абразива в шлифовальных кругах при плоском шлифовании / А. Н. Коротков, В. А. Коротков // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 4. С. 52–56. DOI: 10.17513/snt.39107
21. Коротков, А. Н. Исследование эффективности применения в шлифовальных кругах в качестве пор пустотелого сферокорунда и стеклянных микросфер / А. Н. Коротков, В. А. Коротков, В. Г. Баштанов, М. П. Видяев // Вестник КузГТУ. – 2023. – № 1 (155). С. 13–23. DOI: 10.26730/1999-4125-2023-1-13-23
22. Коротков, В. А. Повышение эффективности шлифования на основе применения шлифовальных кругов с упорядоченной формой зерен и высокопористой структурой // Горное оборудование и электромеханика. – 2025. – №1 (177). С. 25–38. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-1-25-38
23. Григорьев, С. Н. Оценка влияния ориентации абразивных зёрен на эксплуатационные показатели шлифовальных кругов / С. Н. Григорьев, В. А. Коротков // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 2 (73). – С. 21–35.
24. Григорьев, С. Н. Оценка влияния ориентации абразивных зёрен в шлифовальных кругах на составляющие силы резания и их соотношения при шлифовании заготовок из сталей различных марок / С. Н. Григорьев, В. А. Коротков // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2025. – № 3 (74). – С. 29–40.

### ***Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ***

25. Пат. 2292032 РФ, МПК<sup>7</sup> G 01N 3/58. Способ испытания шлифовальных кругов на механическую прочность / А. Н. Коротков, В. А. Коротков. – № 2005112954 ; заявл. 28.04.05 ; опубл. 20.01.07, Бюл. № 2.
26. Пат. 2349446 РФ, МПК<sup>7</sup> В 24D 18/00. Способ изготовления шлифовальных кругов повышенной прочности на бакелитовой связке / В. А. Коротков. – № 2007129252 ; заявл. 30.07.07 ; опубл. 20.03.09, Бюл. № 8.
27. Пат. 2369474 РФ, МПК<sup>7</sup> В 24D 18/00. Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами / В. А. Коротков. – № 2008105086 ; заявл. 11.02.08 ; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28.
28. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613051. Форма шлифовальных зёрен в объёме / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – №2006612327; заявл. 4.07.06; зарег. 1.09.06.
29. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612468. Площадь поверхностей и форма шлифовальных зерен / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2007611718; заявл. 2.05.07; зарег. 13.06.07.
30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610817. Износ шлифовальных зерен / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2007615417; заявл. 27.12.07; зарег. 16.02.08.
31. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614244. Геометрия шлифовальных зерен / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2008613245; заявл. 14.07.08; зарег. 05.09.08.

32. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614263. Угол наклона шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2011612443; заявл. 8.04.11; зарег. 30.05.11.
33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615114. Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2011613167; заявл. 4.05.11; зарег. 29.07.11.
34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616506. Геометрические модели шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2011614679; заявл. 27.06.11; зарег. 19.08.11.
35. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ № 2015619877. Графическое построение геометрических моделей шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2015616594 ; заявл. 16.07.15 ; зарег. 15.09.15.
36. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663831. Угол наклона зёрен в шлифовальных инструментах / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2017617836 ; заявл. 21.07.17 ; зарег. 12.12.17.

*Публикации Scopus и Web of Science на английском языке*

37. Korotkov, V. A. Ways analysis operational characterization increase of the polishing wheels // Modern techniques and technologies (MTT 2003) : Proceeding of 9-th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists, April 7–11, 2003. – Tomsk, Russia, 2003. P. 102–103.
38. Korotkov, V. A. Research of operational characterizations of cutting discs with oriented abrasive grains / V. A. Korotkov, S. I. Petrushin // Applied Mechanics and Materials : Trans Tech Publications, doi : 10.4028/www.scientific.net/ AMM.682.224 – Switzerland, 2014, Vol. 682(2014) P. 224–230.
39. Korotkov, V. A. Forecasting of operational indicators of grinding tools with the controlled form and orientation of abrasive grains / V. A. Korotkov, E. M. Minkin // IOP Publishing : IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 91 (2015) 012041 doi:10.1088/1757-899X/91/1/012041.
40. Korotkov, A.N. Grinding efficiency improvement of hydraulic cylinders parts of mining equipment / A. N. Korotkov, V. A. Korotkov, L. Mametyev, L. Korotkova, T. Terjaeva // The 1-st International Innovative Mining Symposium April 24–26, 2017 : E3S Web of Conferences, 15, 03005 (2017). P. 1–6. DOI:10.1051/e3sconf/20171503005, WOS:000695336900033
41. Korotkov, A.N. Grinding tools made of grains with controlled shape and orientation / A. N. Korotkov, V. A. Korotkov // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTE: MATEC Web of Conferences (2018) Volume 224, October 30, 2018, P. 1–5. DOI:10.1051/matecconf/201822401071, WOS:000476933600071.
42. Korotkov, A. N. Increase of grinding wheel durability / A. N. Korotkov, V. A. Korotkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 709, January 2020, 022020, P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022020, INSPEC: 19463217
43. Korotkov, V. A. Influence of various types of spherocorundum on the performance of grinding wheels // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 971, December 2020, 022095, P. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/971/2/022095, WOS: 000646359100095
44. Korotkov, A. N. Experience of high-density polyethylene as a binding substance in grinding wheels / A. N. Korotkov, V. A. Korotkov, V. Fedorov, S. Vöth // Materials Science Forum, 1037:209-217, July 2021, P. 209–217. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.209, INSPEC: 21062534

45. Korotkov, A.N. Influence of grain shape in grinding wheels on the machining quality of bearing rings / A. N. Korotkov, V. A. Korotkov, N. V. Prokaev // *Materials Research Proceedings "Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment"*, 2022, P. 364-369. DOI:10.21741/9781644901755-63

### *Публикации в сборниках материалов конференций*

46. Korotkov, V. A. Technology and equipment for producing of the experimental cutting discs // *Modern techniques and technologies (МТТ – 2006) : Proceedings of the 12-th international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists, March 27–31, 2006. – Tomsk, Russia, 2006. P. 177–179.*

47. Korotkov, V. A. Research of the exploitation abilities of the cutting discs, which consist of the abrasive grains with controlled orientation // *Modern Techniques and technologies (МТТ 2007) : Proceeding of the 13-th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists, March 26–30, 2007. – Tomsk, Russia, 2007. P. 49–51.*

48. Коротков, В. А. Совершенствование технологии изготовления отрезных шлифовальных кругов // *Современные техника и технологии. Труды IX междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 7–11 апр. 2003 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2003. – Т. 1. – С. 213–214.*

49. Коротков, В. А. Анализ путей повышения эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов // *Молодёжь Поволжья – науке будущего. Труды молодёжн. науч.-практ. конф., 31.3–15.6.2003 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – С. 3–4.*

50. Коротков, В. А. Оценка разрывной прочности шлифовальных кругов // *Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Труды II Всерос. науч.-практ. конф., 29–30 апр. 2004 г. – Юрга : Изд-во ТПУ, 2004. – Т. 1. – С. 122–123.*

51. Коротков, В. А. Изготовление экспериментальных отрезных шлифовальных кругов // *Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении. Труды III Всерос. науч.-практ. конф., 19–25 мая 2005 г. – Юрга : Изд-во ТПУ, 2005. – Т. 1, – С. 31–32.*

52. Коротков, В. А. Оценка прочности шлифовальных кругов // *Современные техника и технологии. Труды XI междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 29 марта–2 апр. 2005 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2005. Т. 1. – С. 253–254.*

53. Коротков, В. А. Влияние формы зёрен на эксплуатационные показатели отрезных шлифовальных кругов // *Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении. Материалы междунар. науч.-практ. конф., 6–9 дек. 2005 г. – Тюмень : Феликс, 2005. – С. 103–105.*

54. Коротков, В. А. Оценка формы шлифовальных зёрен // *Современные техника и технологии. Труды XII междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 27–31 марта 2006 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – Т. 1. – С. 151–153.*

55. Коротков, В. А. Способ испытания шлифовальных кругов на механическую прочность // *Современные проблемы машиностроения. Труды III междунар. науч.-техн. конф., 27–30 ноября 2006 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006. – Т. 1. – С. 204–208.*

56. Коротков, В. А. Исследование влияние формы абразивных зёрен на прочность отрезных шлифовальных кругов на бакелитовой связке // *Инновационные технологии и экономика в машиностроении. Труды V-ой Всерос. науч.-практ. конф., 14–15 сент. 2007 г. – Юрга : Изд-во ТПУ, 2007. – С. 264–271.*

57. Коротков, В. А. Исследование взаимосвязи формы и прочности ориентированных шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, В. Е. Фролов, Д. С. Кустов // *Совре-*

- менные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса. Труды I Всерос. науч.-практ. конф., 24–25 окт. 2007 г. / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2007. – С. 219–224.
58. Коротков, В. А. Исследование износа шлифовальных зёрен с разной ориентацией в теле инструмента / В. А. Коротков, Г. М. Рылов, В. А. Гудин // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса. Труды I Всерос. науч.-практ. конф., 24–25 окт. 2007 г. / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2007. – С. 215–219.
59. Коротков, В. А. Повышение безопасности эксплуатации отрезных шлифовальных кругов // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Материалы VIII междунар. науч.-практ. конф., 12 ноября 2009 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2009. – Т. 1. – С. 117–119.
60. Коротков, В. А. Сравнительный анализ работоспособности отрезных кругов, изготовленных из зёрен с контролируемой формой, задаваемой различными способами // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 8-й Всерос. науч.-практ. конф., 24 марта 2010 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. 91–93.
61. Коротков, В. А. Зависимость величин передних углов шлифовальных зёрен от их формы и пространственной ориентации в теле инструмента / В. А. Коротков, Е. М. Минкин, А. С. Полтораков // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 8-й Всерос. науч.-практ. конф., 24 марта 2010 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. 102–104.
62. Коротков, В. А. Стенд для испытания резанием высокоскоростных отрезных шлифовальных кругов / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков // «Россия Молодая». Материалы II Всерос. науч.-практ. конф., 12–16 апр. 2010 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2010. – сб. № 3. – С. 42–45.
63. Коротков, В. А. Зависимость величин передних углов радиально ориентированных шлифовальных зёрен от их формы и фактора износа / В. А. Коротков, Е. М. Минкин, А. С. Полтораков // «Россия Молодая». Материалы II Всерос. науч.-практ. конф., 12–16 апр. 2010 г. – Кемерово : КузГТУ, 2010. – сб. № 3. – С. 72–75.
64. Коротков, В. А. Геометрия шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин, А. С. Полтораков // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 9-й Всерос. науч.-практ. конф., 16 марта 2011 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – С. 164–166.
65. Коротков, В. А. Оценка величин передних углов шлифовальных зёрен с учётом факторов их ориентации, формы и износа / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // «Россия Молодая». Сборник докладов III Всерос., 56-й науч.-практ. конф., 11–15 апр. 2011 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2011. – С. 167–169.
66. Коротков, В. А. Создание и опытная эксплуатация стенда для испытания резанием высокоскоростных отрезных шлифовальных кругов / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков // «Россия Молодая». Сборник докладов III Всерос., 56-й науч.-практ. конф., 11–15 апр. 2011 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2011. – С. 169–171.
67. Коротков, В. А. Способ ротационно-абразивной отрезки / В. А. Коротков, А. А. Дурсенев, К. Л. Квасов // «Россия Молодая». Материалы III Всерос. науч.-практ. конф., 11–15 апр. 2011 г. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – сб. № 4. – С. 36–39.
68. Коротков, В. А. Программное обеспечение для оценки величин передних углов шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // «Инновации в машиностроении». Сборник трудов II междунар. науч.-практ. конф., 6–8 окт. 2011 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2011. – С. 69–71.
69. Коротков, В. А. Галтовка деталей свободным абразивом с контролируемой формой зёрен после точения / В. А. Коротков, М. В. Веселов // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе.

- Труды 10-й Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – С. 139–142.
70. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей высокопрочных отрезных шлифовальных кругов на различных рабочих скоростях / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 10-й Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – С. 135–139.
71. Коротков, В. А. Исследование геометрических и прочностных характеристик шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 10-й Всерос. науч.-практ. конф., 28 марта 2012 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – С. 148–153.
72. Коротков, В. А. Обработка деталей свободным абразивом с контролируемой формой зёрен / В. А. Коротков, М. В. Веселов // «Россия Молодая». Сборник докладов IV Всерос., 57-й науч.-практ. конф., 24–27 апр. 2012 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2012. – С. 140–141.
73. Коротков, В. А. Исследование влияния повышения прочности и рабочей скорости отрезных кругов на их эксплуатационные показатели / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 11-й Всерос. науч.-практ. конф., 27 марта 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 240–243.
74. Коротков, В. А. Исследование геометрических и прочностных характеристик ориентированных шлифовальных зёрен различной формы / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 11-й Всерос. науч.-практ. конф., 27 марта 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 235–239.
75. Коротков, В. А. Сухая галтовка образцов из латуни Л63 и алюминия А1 абразивными зёрнами марки 53С32Н, разделёнными по признаку формы / В. А. Коротков, М. В. Веселов // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе. Труды 11-й Всерос. науч.-практ. конф., 27 марта 2013 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2013. – С. 125–128.
76. Коротков, В. А. Исследование влияния повышения прочности и рабочей скорости отрезных кругов на их режущую способность и общие энергозатраты при отрезном шлифовании / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков // «Россия Молодая». Сборник докладов V Всерос., 58-й науч.-практ. конф., 16–27 апр. 2013 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2013. – Т. 1. – С. 170–173.
77. Коротков, В. А. Исследование геометрических и прочностных характеристик шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // «Россия Молодая». Сборник докладов V Всерос., 58-й науч.-практ. конф., 16–27 апр. 2013 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2013. – Т. 1. – С. 173–176.
78. Коротков, В. А. Взаимосвязь геометрии и напряжений в ориентированных шлифовальных зёрнах / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Современные проблемы машиностроения. Сборник трудов VII междунар. науч.-техн. конф., 11–13 ноября 2013 г. – Томск : Изд-во ТПУ, 2013. – С. 303–308.
79. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей моделей отрезных шлифовальных кругов из различных типов полимерных связующих / В. А. Коротков, Е. С. Шмаков, Н. Е. Бобков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 66–69.
80. Коротков, В. А. Проектирование шлифовальных инструментов с контролируемой формой и ориентацией зёрен // Наука. Инновации. Техника и Технологии: проблемы, достижения и перспективы. Современные проблемы машиностроения. Доклады междунар. науч. школы-семинара «Достижения фундаментальной науки и образования –

- в инновационные технологии», 12–16 мая 2015 г. – Комсомольск-на-Амуре : Изд-во КнаГТУ, 2015. – С. 176–180.
81. Коротков, В. А. Влияние ориентации абразивных зёрен на эксплуатационные показатели шлифовальных кругов // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь 2015. Материалы Междунар. науч.-тех. конф., 14–15 сентября 2015 г. – Севастополь : СевГУ, 2015. – С. 161–166.
82. Коротков, В. А. Оборудование для реализации технологии производства шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Актуальные проблемы в машиностроении. Ежегодный научно-технический и производственный журнал. Материалы III междунар. науч.-практ. конф., 30 марта 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, – 2016.–№3. – С. 336–340.
83. Коротков, В. А. Устройство для заданной ориентации зерен в шлифовальном круге / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2016. Сборник материалов XVI междунар. науч.-практ. конф., 23–24 ноября 2016 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2016. – №128. – С. 1–4.
84. Коротков, В. А. Изготовление и результаты испытаний экспериментальных кругов с применением в качестве связки эпоксидной смолы / В. А. Коротков, В. В. Мельников // Научно-технический прогресс: Актуальные и перспективные направления будущего: Сборник VI междунар науч.-практ. конф., 18 августа 2017 г. – Кемерово: ЗапСибНЦ, 2017. – Т 2., С. 117 – 120.
85. Коротков, В. А. Исследование влияния ориентации зёрен в шлифовальном круге на эффективность плоского шлифования / В. А. Коротков, Е. М. Минкин //Актуальные проблемы машиностроения: Труды 4-й Международной науч.-практ. конф., 29 марта 2017 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – Т. 4., №3., С. 57 – 61.
86. Коротков, А. Н. Эксплуатационные показатели шлифовальных кругов с контролируемой геометрией зёрен при плоском шлифовании / А. Н. Коротков, В. А. Коротков, Е. М. Минкин, С. В. Пилецкий // Перспективы инновационного развития угольных регионов России: Сборник трудов VI Международной науч.-практ. конф., 9-12 апреля 2018 г. – Прокопьевск: КузГТУ, С. 291 – 295.
87. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов на основе использования зёрен с контролируемой формой и ориентацией / Будущее машиностроения России. Сборник докладов XII Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов (с международным участием)., 24–27 сентября 2019 г. – Москва : МГТУ им Н.Э. Баумана, 2019. – С. 68 – 70.
88. Коротков, В. А. Исследование эффективности применения полого сферокорунда и белого электрокорунда при плоском шлифовании нержавеющей стали / В. А. Коротков, А. А. Аверкин, К. В. Кириенко // «Россия Молодая». Сборник материалов XIII Всероссийской науч.-практ. конф. с междунар. участием, 20–23 апр. 2021 г. – Кемерово : КузГТУ, 2021. – С. 041803.1 – 041803.4
89. Коротков, В. А. Экспериментальная оценка возможности применения цемента в качестве связующего в шлифовальных кругах для чистовых операций / В. А. Коротков, В. Г. Баштанов, Е. В. Ескин // «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» Сборник материалов V Междун. науч.-практ. конференции, 19 – 20 октября 2021 г. – Кемерово : КузГТУ, 2021. – С. 456 – 461.
90. Коротков, В. А. Теория и практика применения стандартов в области оценки прочности шлифовальных кругов / В. А. Коротков, В. В. Мельников // «Инновации в информационных технологиях, машиностроении и автотранспорте» Сборник материалов VII Междунар. науч.-практ. конф., 21 – 23 ноября 2023 г. – Кемерово: КузГТУ, 2023. – С. 444 – 448.

*Научное издание*

**Коротков Виталий Александрович**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ СТАЛЕЙ ПУТЁМ  
СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ  
С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН**

*Автореферат диссертации*

*на соискание ученой степени доктора технических наук*