

На правах рукописи



КОРОТКОВ ВИТАЛИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
ОТРЕЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА ОСНОВЕ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЁРЕН С КОНТРОЛИРУЕМОЙ
ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ**

Специальность

05.03.01- « Технологии и оборудование механической и физико-
технической обработки»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Томск 2008

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования «Томский
политехнический университет»

Научный руководитель	доктор технических наук, профессор Петрушин Сергей Иванович
Официальные оппоненты	доктор технических наук, профессор Кольцов Владимир Петрович кандидат технических наук, доцент Беломестных Александр Сергеевич
Ведущая организация	ООО «Машиностроительная компа- ния НИКО» г. Кемерово

Защита состоится « 25 » сентября 2008 г. В 12⁰⁰ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.073.02 в Иркутском государственном тех-
ническом университете по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского госу-
дарственного технического университета и в научно-технической библио-
теке Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Бе-
линского, 53-а.

Автореферат разослан «22» августа 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор



В.М.Салов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТЫ

Актуальность работы. Анализ эффективности применения отрезных шлифовальных кругов показывает, что, несмотря на их широкое распространение, они лишь частично используют свои потенциальные возможности. Основными причинами этого являются неупорядоченность формы и расположения абразивных зёрен в теле данных инструментов, которые формируют произвольную и часто неблагоприятную геометрию их режущих микроклиньев. В результате большая часть зёрен неэффективно участвует в совокупном процессе резания. Произвольная форма и хаотичная ориентация зёрен формируют также дефекты структуры отрезных кругов и, как следствие, снижают их прочность и допустимую скорость работы. Подбор формы и упорядочение ориентации шлифовальных зёрен в отрезных кругах открывают перспективу повышения физико-механических и режущих свойств этих инструментов и представляет собой актуальную проблему, что подтверждается выигранным грантом по федеральной программе «Старт-06» «Новое поколение шлифовальных инструментов на основе зёрен с заданной ориентацией и контролируемой формой».

Цель диссертационной работы состоит в повышении эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов на основе использования зёрен с контролируемой формой и ориентацией.

Методики исследований. Работа выполнена на базе теории шлифования материалов, теории прочности хрупких тел, теории прочности вращающихся объектов, теории вибрационного сепарирования частиц, теории математического моделирования, статистической обработки и корреляционно-регрессионного анализа результатов испытаний с широким привлечением возможностей ЭВМ, на основе известного и специально разработанного программного обеспечения. В работе использованы существующие и оригинальные методики количественной оценки формы зёрен, определения режущей способности, износа, коэффициента шлифования, эффективной мощности и температуры при резании экспериментальными кругами, определения микротвердости и изучения микроструктуры металла заготовок из разных материалов после отрезки опытными кругами. Эксперименты проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием современных измерительных приборов и оборудования, в том числе и на немецкой фирме по производству отрезных кругов.

Научная новизна работы состоит:

в разработке:

- концепции создания новых конструкций отрезных шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и ориентацией;
- нового способа изготовления отрезных кругов с контролируемой ориентацией зёрен (заявка на патент РФ №200810586);
- нового способа изготовления отрезных кругов повышенной прочности из зёрен с контролируемой формой в зоне посадочного отверстия (заявка на патент РФ №2007129252);
- нового статического способа испытания шлифовальных кругов на разрывную прочность (патент РФ №2292032);

- новых методов оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве, оценки площади поверхности зёрен и их количества в единице объёма, оценки износа и прочности зёрен;

в установлении:

- влияния формы зёрен на: размер их площади поверхности, количество в единице объёма, интенсивность износа и прочность; разрывную прочность отрезных шлифовальных кругов, состоящих из зёрен с контролируемой формой;

- влияния формы и ориентации зёрен в отрезных шлифовальных кругах на их режущую способность, износ, коэффициент шлифования, мощность и температуру резания, а также на микротвердость и микроструктуру металла заготовок после отрезки;

в разработке:

- математических моделей, отражающих влияние формы и ориентации зёрен на их рабочие характеристики, а также на эксплуатационные показатели отрезных кругов и качество обработки заготовок; моделей, позволяющих прогнозировать и целенаправленно изменять работоспособность отрезных кругов в зависимости от требований к стойкости инструментов, к производительности и качеству обработки.

Практическая ценность работы заключается:

в разработке:

- модульной конструкции стенда для динамических испытаний отрезных кругов на разрывную прочность;

- конструкции приспособления для статической оценки разрывной прочности отрезных кругов, позволяющей упростить и обезопасить такие испытания;

- программного обеспечения для оценки: формы зёрен в трёхмерном пространстве, взаимосвязи формы и площади поверхности зёрен, износа зёрен (соответственно, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ №2006613051, №2007612468 и №2008610817);

в изготовлении:

- опытных партий отрезных шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и ориентацией, подтвердивших свои повышенные эксплуатационные возможности по сравнению со стандартными отрезными кругами;

в разработке:

- практических рекомендаций по эффективному применению отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен.

Реализация результатов работы. Экспериментальные отрезные шлифовальные круги испытаны и внедрены на ООО «Завод электротехнической аппаратуры» г. Кемерово, ООО «Сибирские промышленные технологии» г. Кемерово, авторемонтных мастерских компании ОАО «Кузбассразрезуголь» г. Белово, ООО «Агромаш» г. Кемерово. Кроме того, разработки, выполненные по теме диссертации используются в учебном процессе для студентов машиностроительных специальностей ТПУ.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и обсуждены на научно-практической конференции «Молодежь Поволжья – науке будущего» (г. Ульяновск, 2003 год), на IX-й, XI-й, XII-й и XIII-й международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2003, 2005, 2006, 2007 гг.), на II-й, III-й, V-й Всероссийских научно-практических конференциях «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении» (г. Юрга, 2004, 2005, 2007 гг.), на III-й международной научно-практической конференции «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоёмкие технологии в машиностроении» (г. Тюмень, 2005 г.), на 4-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе» (г. Новосибирск, 2006 г.), на I-й Всероссийской научно-практической конференции «Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса» (г. Кемерово, 2007 г.). Результаты работы обсуждались также на научных семинарах кафедры «Технология автоматизированного машиностроительного производства» ТПУ в период с 2003 по 2008 гг. Полное содержание работы доложено на научном семинаре факультета технологии и компьютеризации машиностроения ИрГТУ. Отдельные разделы работы заслушаны на семинарах кафедры «Станкостроение» Технического университета г. Кемнитц (Германия) и техсовете фирмы по производству отрезных шлифовальных кругов «Rottluff» (Германия) при прохождении там трёх научных стажировок по теме диссертации.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 19 печатных работ (в т.ч. 5 – в журналах, перечня ВАК), получен патент на изобретение РФ и три свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Она изложена на 194 страницах машинописного текста, содержит 63 рисунка, 3 таблицы, список литературы из 172 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и обозначены пути её достижения, охарактеризованы методики исследования, отражены научная новизна и практическая ценность работы, представлены сведения о её реализации и апробации, приведена информация об опубликовании результатов работы, а также о её структуре и объёме.

В первой главе отражен анализ состояния исследуемой проблемы, сформулирована цель работы и определены задачи по её достижению. На основе работ Бокучавы Г.В., Ваксера Д.Б., Димова Ю.В., Зайцева А.Г., Ильичёва Л.Л., Ипполитова Г.М., Кольцова В.П., Корчака С.Н., Кудасова Г.Ф., Курдюкова В.И., Литовки Г.В., Полетики М.Ф., Резникова А.Н., Старкова В.К., Филимонова Л.Н., Худобина Л.В., Якимова А.В., Янюшкина А.С., Ящерицина П.И., Droessler H., Lutze H., Opitz H., Peklenik J. изучены особенности процесса шлифования и свойства компонентов абразивных отрезных кругов. Названные авторы в своих работах указывают на то, что процесс шлифования, в том числе и

отрезного, является результатом группового микрорезания отдельными зёрнами. Эффективность такого процесса зависит от эффективности резания каждым единичным зерном: чем лучше работает каждое отдельное зерно, тем выше интегральный показатель – работоспособность инструмента в целом. Но для того, чтобы любое зерно работало с полной отдачей, необходимо чтобы оно обладало благоприятной, для данного случая резания, геометрией. В свою очередь, геометрия зерна определяется двумя главными факторами – формой и расположением в теле инструмента. Между тем, анализ показывает, что эти факторы в практике изготовления отрезных кругов, как правило, остаются бесконтрольными и незадействованными. Решение проблемы по упорядочению формы и ориентации зёрен открывает возможность более полного использования их потенциальных возможностей и на этой основе повышения эксплуатационных показателей инструментов в целом. Базируясь на изложенных аргументах, сформулирована цель данной работы и намечены задачи по её достижению.

Во второй главе представлены результаты исследований по установлению влияния формы и ориентации зёрен на их геометрические параметры, физико-механические и режущие свойства. Для идентификации встречающихся разновидностей форм шлифовальных зёрен предложен новый метод количественной оценки этого параметра, основанный на определении коэффициентов, равных отношению размеров сфер, описанных и вписанных снаружи и внутри пространств, занимаемых зёрнами. Данный метод оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве, вместе с методом установления формы зёрен на плоскости, позволили точно и оперативно определять форму всех зёрен, с которыми затем проводились эксперименты и из которых изготавливались опытные инструменты. Анализ существующих методов и устройств для разделения массы свободного абразива на ряд фракций с одинаковой формой зёрен показал, что для этой цели может быть эффективно применен метод разделения на основе сил трения, реализуемый с помощью вибросепаратора. Описана конструкция вибросепаратора, использованного для выделения из исходной массы обычного свободного абразива зёрен определённой и одинаковой формы. Для вычисления площади поверхности зёрен разработан метод и программное обеспечение для ЭВМ. С помощью них установлено, что чем больше коэффициент формы зёрен (K_{ϕ}), тем большей площадью поверхности (S) они обладают. С учётом размерного фактора ($D_{\text{вп}}$) эта закономерность для зёрен 13A63H представлена в виде модели:

$$S = -387800 + 70880 \cdot K_{\phi} + 3572 \cdot D_{\text{вп}} \quad (1)$$

Как показал разработанный метод, основанный на использовании мерной ёмкости с фиксированным объёмом, планшетного сканера и компьютерной программы, форма зёрен может повлиять на плотность их упаковки в единице объёма шлифовального круга. На его основе установлено, что чем больше K_{ϕ} , тем большее число зёрен (N) находится в одинаковом объёме пространства (в т.ч. и инструмента). Для зёрен марки 13A63H эта зависимость описывается формулой:

$$N = 1876,50 \cdot e^{0,15 \cdot K_{\phi}} \quad (2)$$

Для оценки влияния формы и ориентации зёрен на их прочность разработан метод и сконструирована установка, которая в автоматическом режиме и с

учётом критерия хрупкого разрушения позволяет определять усилия разрушения зёрен различных марок и зернистостей с разной формой и ориентацией по отношению к действующей нагрузке.

В результате экспериментов на этой установке выявлено, что чем больше K_{ϕ} , тем меньшее усилие (P) требуется для их разрушения, а зёрна с тангенциальной ориентацией ($\Theta=0^\circ$) разрушаются при большем усилии сжатия, чем зёрна с радиальной ориентацией ($\Theta=90^\circ$). Причём, чем больше K_{ϕ} , тем эта закономерность носит более выраженный характер. Полученные экспериментальные данные описаны экспоненциальными моделями:

$$\text{для } \Theta=0^\circ: P = 495,88 \cdot e^{-0,94 \cdot K_{\phi}}; \quad (3) \quad \text{для } \Theta=90^\circ: P = 841,21 \cdot e^{-1,25 \cdot K_{\phi}} \quad (4)$$

При изучении износа зёрен использованы модели отрезных шлифовальных кругов из реальных зёрен и оптически прозрачной связки на базе эпоксидной смолы, близкой по свойствам бакелитовой связке. Это позволяло визуально наблюдать за износом каждого отдельного зерна, выходящего на рабочую поверхность инструмента. В процессе испытаний моделей кругов с помощью специальной программы для ЭВМ собиралась и анализировалась информация об особенностях работы и износа каждого зерна, расположенного на рабочей поверхности модели круга вдоль по его периметру. Это позволило установить, что полное время работы (контакта с металлом) зёрен (T) в модели отрезного круга колеблется в интервале 1,8 – 4,6 с и зависит от формы зёрен и их ориентации в теле инструмента. Длительнее всего в круге работают зёрна с малыми значениями K_{ϕ} (изометрические зёрна) и зёрна с тангенциальной ориентацией. Данные закономерности описываются моделями:

$$\text{для } \Theta=0^\circ: T = 3,99 - 1,14 \cdot \ln(K_{\phi}); \quad (5) \quad \Theta=90^\circ: T = 4,10 - 1,69 \cdot \ln(K_{\phi}) \quad (6)$$

Установленные закономерности позволили уяснить общий механизм действия факторов формы и ориентации зёрен и, на этой основе, дали возможность перейти к более сложному этапу конструирования экспериментальных отрезных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен.

В третьей главе представлены предлагаемые конструкции отрезных шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и ориентацией; описана технология их изготовления, реализуемая в лабораторных условиях и включающая сепарацию зёрен, приготовление формовочной смеси, формование и термообработку опытных кругов; охарактеризовано технологическое оборудование и оснастка. Приведено описание предлагаемого способа ориентации зёрен в шлифовальном круге, основанного на использовании электростатического эффекта. Суть способа поясняется рис. 1, на котором показаны укладка абразивной смеси (*a*) и расположение электродов (*б*) при радиальной ($\Theta=90^\circ$) и тангенциальной ($\Theta=0^\circ$) ориентации зёрен в шлифовальном круге. Здесь 1 – основание, 2 – выталкиватель, 3 – сердечник, 4 – формовочная плита, 5 – кольцевая обойма, 6 – электроды, 7 – корпус, 8 – контакты, 9 – абразивная смесь, 10 – сито, 11 – абразивные гранулы, 12 – ориентированные зёрна. На способ изготовления подана заявка на изобретение (№2008105086) и на его базе изготовлено более 40 экспериментальных отрезных кругов.

Описан экономичный способ повышения прочности отрезных кругов, ос-

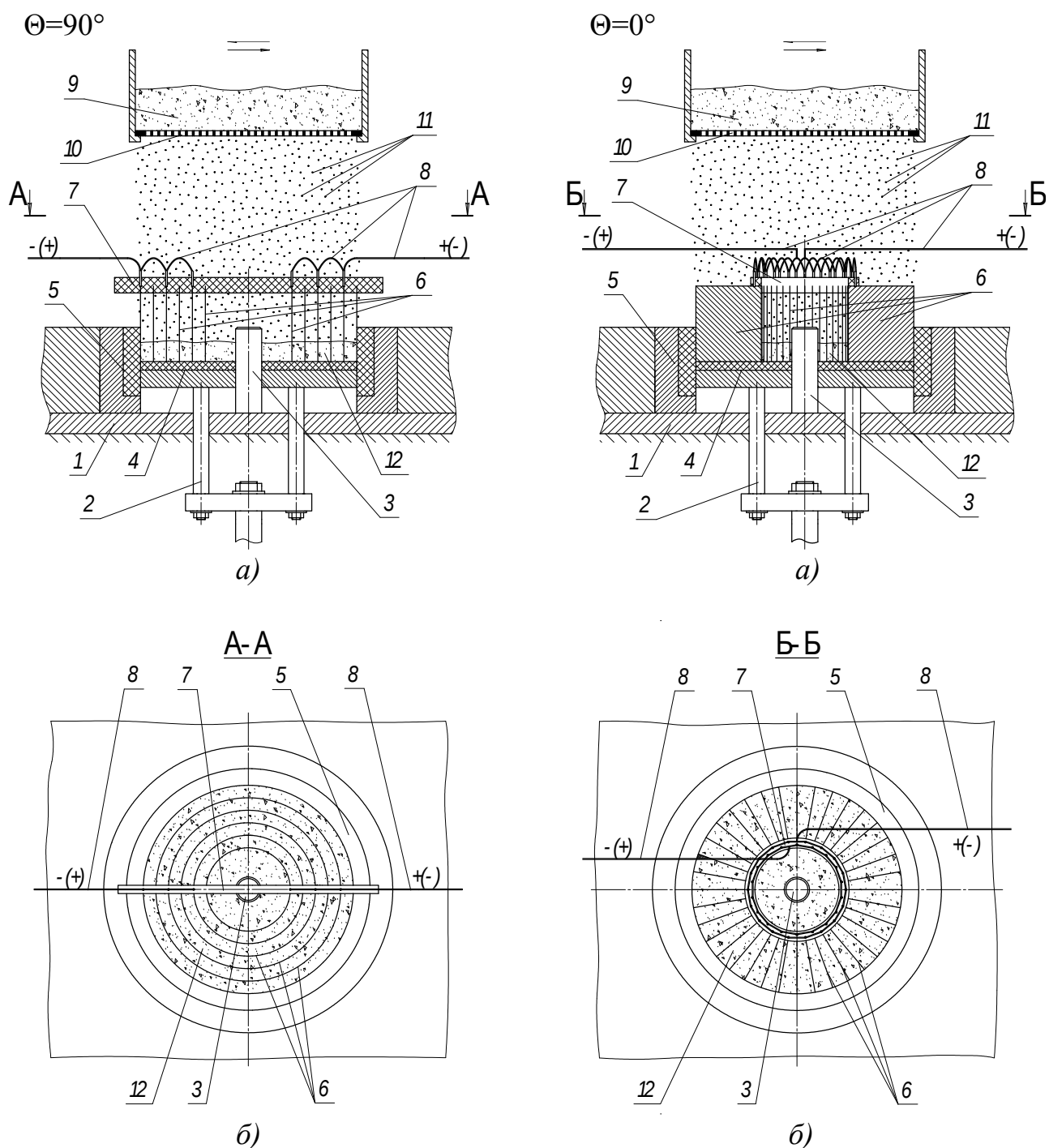


Рис.1. Укладка абразивной смеси (а) и расположение электродов (б) при радиальной ($\Theta=90^\circ$) и тангенциальной ($\Theta=0^\circ$) ориентации зерен в шлифовальном круге

нованный на упрочнении этих инструментов в зоне посадочного отверстия за счёт применения зёрен игольчато-пластинчатой разновидности. Изложены этапы и особенности изготовления отрезных кругов повышенной прочности. На способ подана заявка на изобретение (№2007129252) и на его основе изготовлено более 50 экспериментальных отрезных кругов.

В четвертой главе отражен анализ поиска эффективных способов и средств контроля прочности отрезных кругов и представлены результаты исследований по установлению влияния формы зёрен на прочность этих инстру-

ментов. Описана конструкция разработанного стенда для контроля прочности отрезных кругов динамическим методом, т.е. путём их вращения с определенной или непрерывно увеличивающейся скоростью.

Представлен статический способ оценки прочности шлифовальных кругов, основанный на нагружении посадочных отверстий неподвижных инструментов распределенной нагрузкой, вызывающей появление в кругах тангенциальных напряжений, аналогичных тем, которые возникают в них при вращении. Преимущества способа состоят в том, что он может быть реализован везде, где есть несложное оборудование для создания одноосного сжатия (прессы, домкраты и др.) и в том, что он не требует наличия усиленных заграждений для защиты от разлетающихся осколков кругов, т.е. более безопасен при работе. На способ получен патент на изобретение (Пат. 2292032 РФ). С его помощью (а также динамического метода) в результате прочностных испытаний установлено, что увеличивая K_ϕ можно повысить прочность отрезных кругов. Для кругов без армирующих элементов при увеличении коэффициента формы зёрен в зоне у посадочного отверстия с $K_\phi \approx 1,87$ до $K_\phi \approx 3,31$ можно добиться повышения средней скорости разрыва кругов на 27 м/с (т.е. на 30%) (рис. 2, а), а для кругов с армирующими элементами (рис. 2, б) это увеличение достигает 17 м/с (рост на 12%), по сравнению со стандартными кругами без зоны упрочнения.

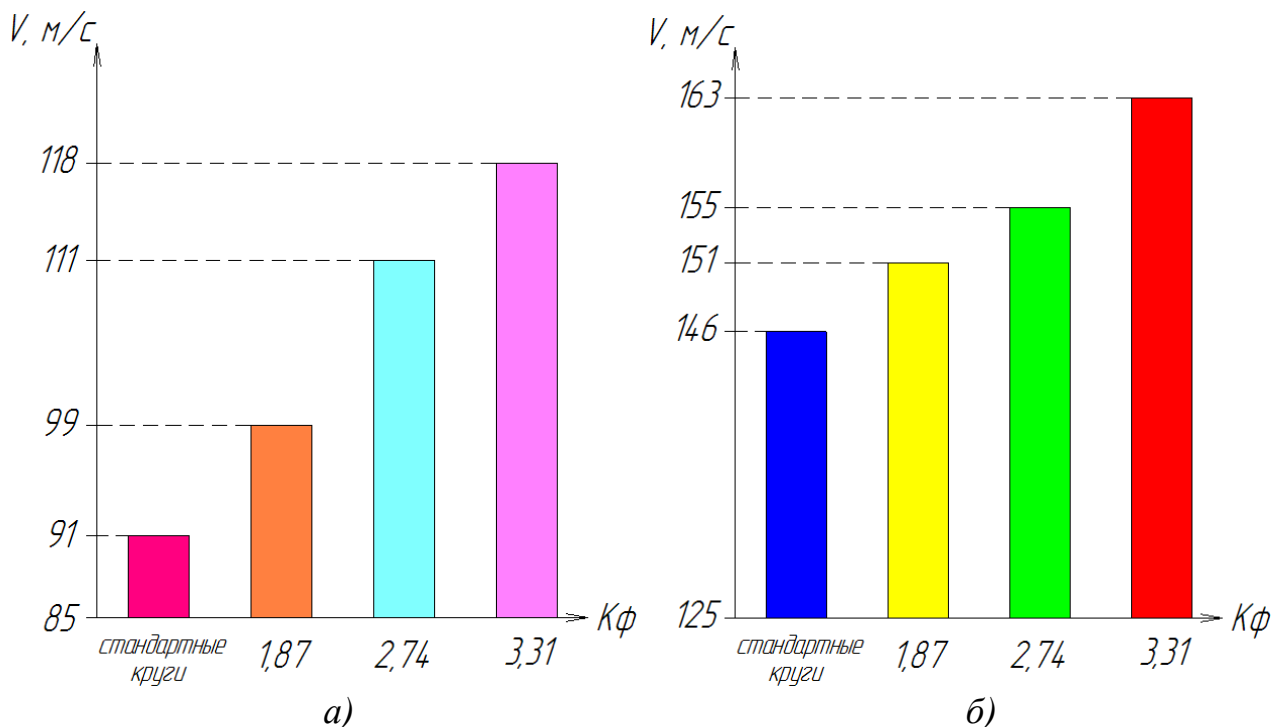


Рис. 2. Скорость разрыва (V) отрезных кругов с зоной упрочнения из зёрен с контролируемой формой (K_ϕ), без армирующих элементов (а) и с армирующими элементами (б)

В пятой главе представлены результаты исследований по установлению влияния формы зёрен на эксплуатационные показатели отрезных шлифовальных кругов. Изложена методика исследований, включающая оценку таких наиболее важных эксплуатационных параметров экспериментальных инструментов, как: режущая способность, коэффициент шлифования, эффективная мощ-

ность резания. Методика охватывала также оценку качества отрезной операции на основе регистрации температуры в зоне резания, изучения изменений микротвердости и микроструктуры металла заготовок после отрезки. Результаты испытаний отрезных кругов 230×3×32 13А 63Н [K_ф] СТЗ Б 50 м/с с контролируемой формой зёрен (на стали 10), полученные с помощью испытательного комплекса на базе станка 3А64Д, представлены на рис. 3, а, б, в, г.

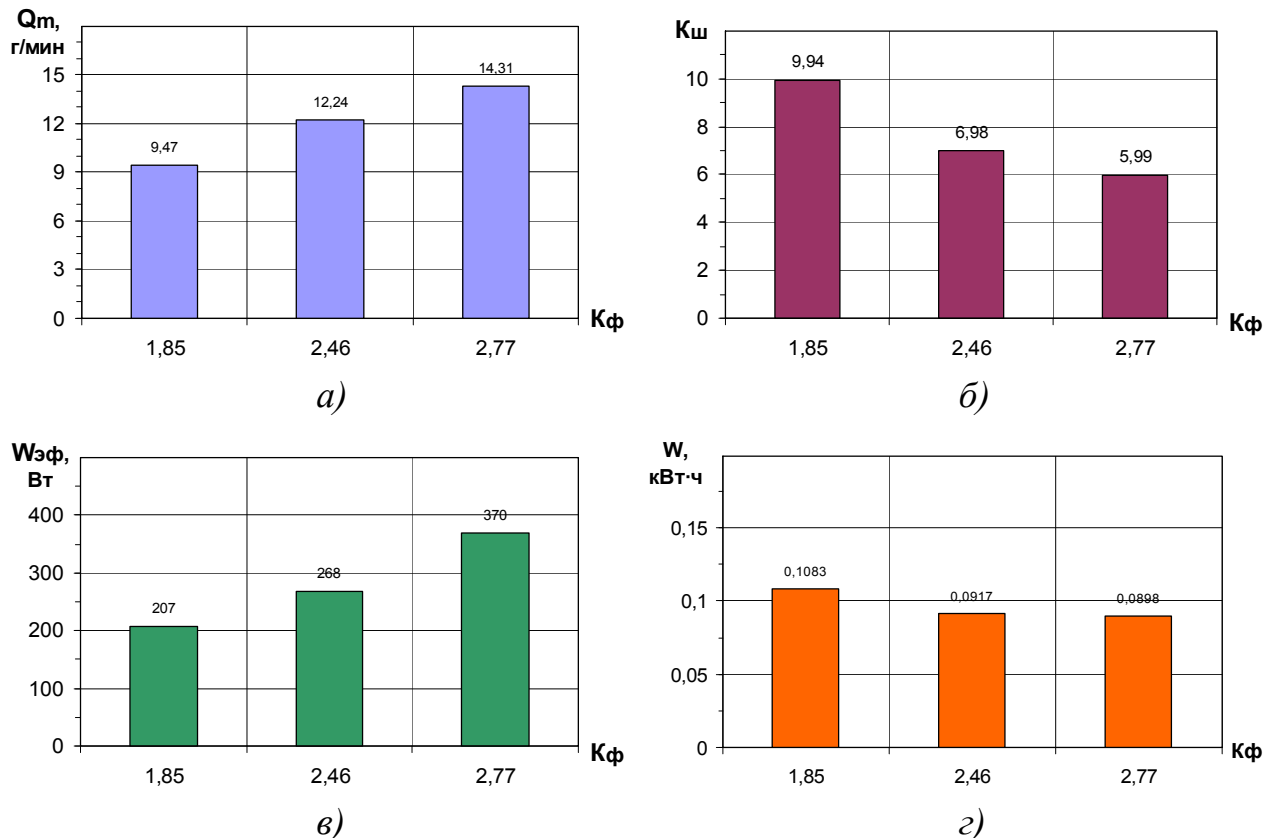


Рис.3. Режущая способность (а), коэффициент шлифования (б), эффективная мощность (в) и энергозатраты (г) отрезных кругов с контролируемой формой зерен.

Экспериментальные данные говорят о том, что с увеличением K_{ϕ} режущая способность отрезных кругов и эффективная мощность резания растут, а коэффициент шлифования и энергозатраты падают. Выявленные закономерности, для первых трёх параметров, адекватно отражаются следующими математическими моделями:

$$Q_m = 4,08 \cdot e^{0,45 \cdot K_{\phi}}; \quad (7) \quad K_{\text{ш}} = 21,32 \cdot K_{\phi}^{-1,25}; \quad (8) \quad W_{\text{эф}} = 65,09 \cdot e^{0,61 \cdot K_{\phi}} \quad (9)$$

Суть явлений, которые они отражают, состоит в том, что круги из зёрен с большими K_{ϕ} , из-за их более острых углов и режущих кромок, а также большего числа в единице объёма инструмента, более активно режут металл (на 17% лучше, чем стандартные круги) и, поэтому, требуют больших затрат по эффективной мощности. Вместе с тем, такие зёрна при работе интенсивно изнашиваются и, по этой причине, коэффициент шлифования кругов падает. Круги из зёрен с малыми K_{ϕ} изнашиваются медленнее, их стойкость выше и, как следствие, выше (на 42% по сравнению со стандартными кругами) их коэффициент шлифования. Поскольку время отрезки заготовок кругами с большими K_{ϕ}

меньше, чем при отрезке другими инструментами, то общие энергозатраты на выполнение одинакового объёма работы, несмотря на растущую эффективную мощность, у них тоже несколько меньше.

Оценка температуры в зоне резания путём анализа цветов побежалости на поверхности металла разрезанных заготовок, измерение микротвердости и изучение на шлифах микроструктуры металла заготовок после отрезки кругами с разной формой зёрен показали, что по мере увеличения коэффициента формы зёрен теплонапряженность процесса резания уменьшается, а вместе с этим уменьшаются размеры зоны поверхностного упрочнения металла заготовок. По результатам исследования температуры нагрева металла заготовок построены математические модели.

Эксплуатационные показатели отрезных кругов из зёрен с контролируемой формой у посадочного отверстия оценивались на примере испытания инструментов с характеристикой: 230×3×22 13А 63Н / 53С 32Н [K_{ϕ}] Т2 БУ 90 м/с. Зона вблизи посадочного отверстия у них изготавливалась из зёрен 53С32Н с игольчато-пластинчатой формой, благодаря чему удалось повысить их прочность и поднять допустимую скорость работы с 80 до 90 м/с. В целях оценки эффекта, достигаемого за счет повышения скорости обработки, испытания этих кругов проводились на дискретно изменяемых (в пределах 60 – 90 м/с) скоростях резания. Результаты испытаний отражены на рис. 8, а, б, в, г.

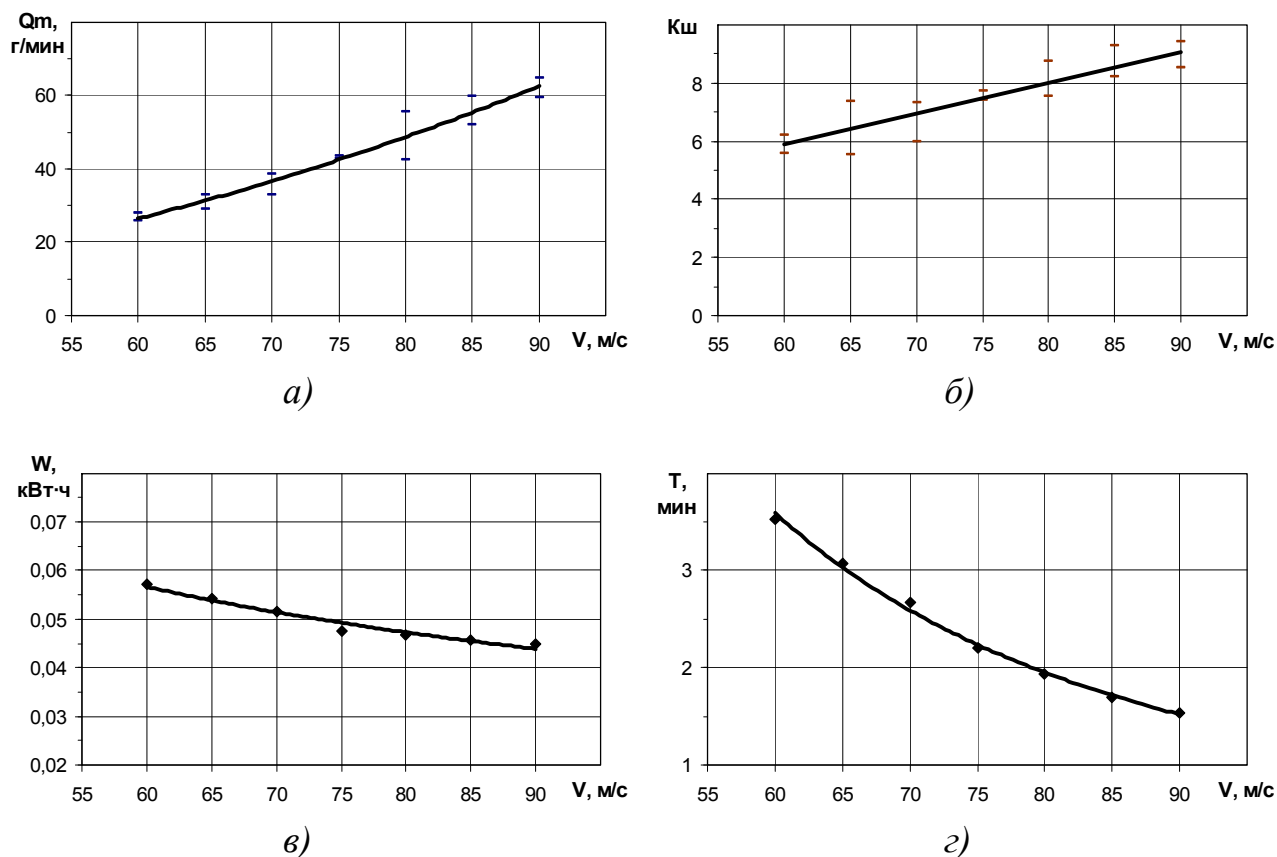


Рис. 8. Влияние скорости резания на режущую способность (а), коэффициент шлифования (б), энергозатраты (в) и основное технологическое время (г) при эксплуатации кругов с повышенной прочностью

По полученным результатам построены математические модели, адекватно отражающие наблюдаемые явления:

$$Q_m = 0,0045 \cdot V^{2,12}; \quad (10) \quad K_{ш} = 0,1053 \cdot V - 0,4307; \quad (11) \quad W_{эф} = 136,25 \cdot e^{0,02 \cdot V} \quad (12)$$

Их физический смысл состоит в том, что при повышении скорости резания большее число зёрен в единицу времени срезает металл, поэтому режущая способность круга растёт (при $V=90$ м/с она на 27% выше, чем у стандартных кругов при $V=80$ м/с), а коэффициент шлифования повышается на 11%. Увеличивается потребляемая эффективная мощность, но из-за уменьшения времени отрезки общие энергозатраты уменьшаются на 4%. Исследования качества отрезки заготовок кругами из зёрен с контролируемой формой в зоне посадочного отверстия показали, что при увеличении скорости резания общая теплонапряженность процесса шлифования уменьшается. Это следует из построенных графиков и математических моделей (для стали 10):

$$\text{при } V=80 \text{ м/с: } T = 429,96 \cdot e^{-0,27 \cdot L}; \quad (13) \quad \text{при } V=90 \text{ м/с: } T = 408,64 \cdot e^{-0,34 \cdot L} \quad (14)$$

где T – температура нагрева металла на разном удалении (L) от плоскости отрезки. Диапазон изменения микротвёрдости металла заготовок и размеры зоны поверхностного упрочнения также уменьшаются при увеличении скорости резания в рассматриваемом диапазоне.

В шестой главе представлены результаты исследований эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов с контролируемой ориентацией зёрен. Исследования выполнены на шлифовальных кругах без упрочняющих и с упрочняющими элементами с характеристиками, соответственно: $230 \times 3 \times 32$ 13А 40Н [Θ] Т2 Б 50 м/с и $230 \times 4 \times 32$ 13А 40Н [Θ] Т2 БУ 80 м/с. Круги изготавливались с радиальной ($\Theta=90^\circ$), тангенциальной ($\Theta=0^\circ$), ориентацией зёрен и, для сравнения, – без ориентации зёрен ($\Theta=\text{var}$). Испытания кругов без упрочняющих элементов проводились на стали 10, а кругов с упрочняющими элементами – на сталях из трёх разных групп: конструкционной, коррозионно-стойкой и инструментальной. Для испытаний предварительно выбирали режимы резания. Результаты исследований для кругов без упрочняющих элементов отражены на диаграммах рис. 9, а, б, в, а кругов с упрочняющими элементами на диаграммах рис. 9, г, д, е. Полученные результаты говорят о том, что режущая способность у кругов с радиальной ориентацией на 14-17% выше, чем у стандартных кругов, они при работе требуют больших на 6-29% затрат эффективной мощности и их коэффициент шлифования, из-за интенсивного износа, ниже, чем у стандартных кругов. Круги с тангенциальной ориентацией зёрен, напротив, изнашиваются медленно, имеют более высокий (на 25-30%) коэффициент шлифования и работают с меньшими (на 5-17%) затратами эффективной мощности, чем стандартные круги.

При переходе от тангенциальной ориентации зёрен к их радиальному расположению общая теплонапряженность процесса резания и степень нагрева заготовок снижается. Например, при шлифовании стали 10 отрезными кругами с радиальной ориентацией зёрен, по сравнению со стандартными кругами с неориентированными зёрнами, температура в зоне резания снижается примерно на 30°C , а глубина зоны термического влияния уменьшается в 1,3 раза.

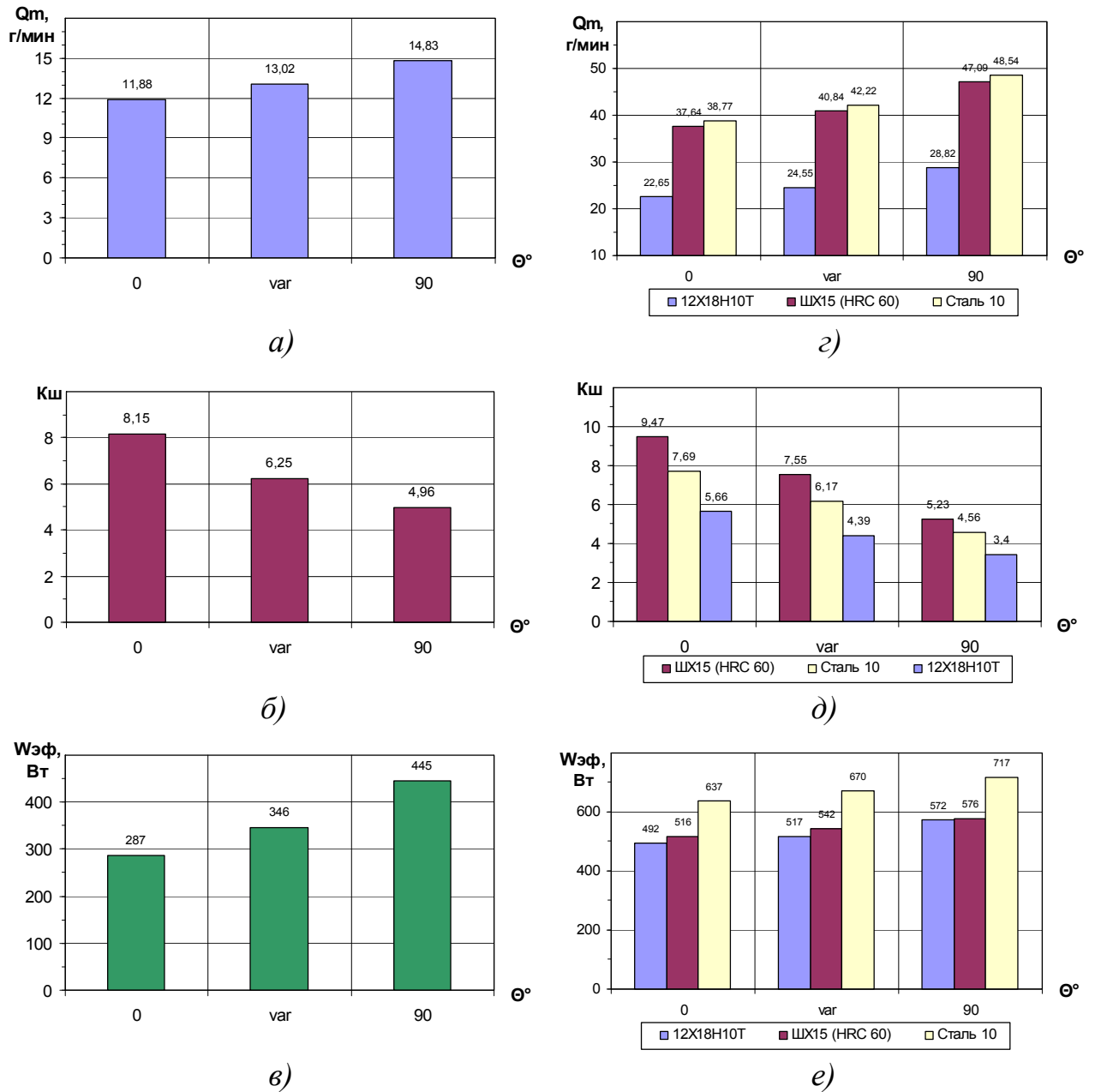


Рис. 9. Зависимость режущей способности (Q_m), коэффициента шлифования ($K_{ш}$) и эффективной мощности ($W_{эф}$) от угла ориентации шлифовальных зерен (Θ) у отрезных кругов без упрочняющих элементов (а, б, в) и с упрочняющими элементами (з, д, е)

В целом аналогичные результаты получены и для других марок сталей. Представлены графики температуры прогрева металла, измерения микротвёрдости металла заготовок после отрезки и фотографии шлифов, отражающие состояние микроструктуры металла разрезанных заготовок. Для всех испытуемых марок сталей выведены математические модели, показывающие изменение температуры нагрева металла (T) в зависимости от ориентации зёрен (Θ) и расстояния от плоскости отрезки (L), которые, например, для стали 10 имеют следующий вид:

$$\Theta=0^\circ: T=481,61 \cdot e^{-0,16 \cdot L}; \quad (15)$$

$$\Theta=\text{var}: T=465,12 \cdot e^{-0,18 \cdot L}; \quad (16)$$

$$\Theta=90^\circ: T=434,33 \cdot e^{-0,21 \cdot L}; \quad (17)$$

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана концепция создания новых конструкций отрезных шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и ориентацией; такие круги (в количестве порядка 200 шт.) изготовлены, испытаны в лабораторных и производственных условиях, где доказали свои преимущества по сравнению со стандартными кругами.

2. Для выделения из общей массы стандартного свободного абразива зёрен с той или иной конкретной формой использован метод разделения частиц на основе сил трения, реализованный на практике с помощью вибросепаратора. Для идентификации формы разделённых зёрен разработан новый количественный метод оценки их формы в объёме, на программное обеспечение к которому получено свидетельство об официальной регистрации № 2006613051.

3. Разработан метод и программное обеспечение по установлению взаимосвязей формы зёрен с площадью их поверхности и количеством в единице объёма (свидетельство об официальной регистрации № 2007612468). На их основе установлено, что зёрна с большими коэффициентами формы имеют большую площадь контакта со связкой и, следовательно, более прочную связь с ней, а количество игольчато-пластинчатых зёрен превышает количество изометрических зёрен, находящихся в одинаковом объёме пространства (в т.ч. и инструмента). Модели (1), (2).

4. С помощью разработанных метода и автоматической установки, доказано, что, чем меньше коэффициент формы зёрен, тем они прочнее: прочность изометрических зёрен ($K_{\phi} \approx 1,80$) в 3,6 – 4,9 раз выше прочности игольчато-пластинчатых зёрен ($K_{\phi} \approx 3,13$). Более прочными являются зёрна с тангенциальной ориентацией: их превосходство в прочности над зёрнами с радиальной ориентацией тем существеннее, чем больше их коэффициент формы и оно может достигать 50% при $K_{\phi} \approx 3,13$. Модели (3), (4).

5. Разработан метод и программное обеспечение для оценки взаимосвязи формы зёрен с их износом (свидетельство о государственной регистрации № 2008610817). Это позволило установить, что чем меньше коэффициент формы зерна, тем больше его стойкость, которая в модели круга колеблется в интервале 1,8 – 4,5 с, и тем больше размер образуемых площадок износа. Стойкость зёрен с тангенциальной ориентацией на 6 – 67% выше, чем стойкость радиально ориентированных зёрен, причём эта разница становится больше по мере увеличения коэффициента формы. Модели (5), (6).

6. При изготовлении экспериментальных инструментов использована типовая технология изготовления отрезных кругов на бакелитовой связке, модернизированная добавлением операции предварительной сортировки зёрен, операции по их ориентации и укладке в зоне вблизи посадочных отверстий. Для изготовления отрезных кругов с контролируемой ориентацией зёрен разработан новый способ, основанный на использовании электростатического эффекта, на который подана заявка на изобретение РФ № 2008105086 (приоритет от 11.02.2008 г.). Для изготовления отрезных кругов повышенной прочности разработан новый способ упрочнения их зон вблизи посадочного отверстия, на ко-

торый также подана заявка на изобретение РФ № 2007129252 (приоритет от 30.07.2007 г.).

7. Для оценки прочности отрезных шлифовальных кругов динамическим методом разработан и изготовлен стенд на базе универсально-заточного станка 3А64Д в виде модульной съёмной конструкции, а для оценки прочности кругов в статических условиях разработан новый способ, на который получен патент на изобретение (Пат. 2292032 РФ) и с его помощью сделана (или продублирована) основная часть прочностных испытаний экспериментальных кругов.

8. Упрочнение зоны посадочного отверстия отрезных кругов игло-пластинчатыми зёрнами позволяет повысить среднюю разрывную скорость этих инструментов на 30% (27 м/с) для кругов без армирующих элементов и на 12% (17 м/с) для кругов с армирующими элементами по сравнению со стандартными инструментами.

9. Установлено, что использование зёрен игло-пластинчатых разновидностей в отрезных кругах ($K_{\phi} \approx 2,77$) по сравнению со стандартными кругами дает: повышение режущей способности на 17%, при некотором снижении или паритете общих энергозатрат, снижение теплонапряженности процесса резания и уменьшении прогрева металла заготовок на 9 – 18°C в зависимости от расстояния от плоскости отрезки, а также уменьшение зоны поверхностного упрочнения металла заготовок (сталь 10). Отрезные круги из зёрен с малыми коэффициентами формы (изометрических) обладают (из-за высокой стойкости) более высоким (на 42%) коэффициентом шлифования. Модели (7), (8), (9).

10. При упрочнении отрезных кругов за счёт введения в зону посадочных отверстий зёрен с большими коэффициентами формы их режущая способность повышается (за счёт повышения рабочей скорости) на 27%, а коэффициент шлифования – на 11%, при некотором снижении общих энергозатрат (на 4%), снижении теплонапряжённости процесса резания и уменьшении прогрева металла заготовок на 21 – 33°C в зависимости от расстояния от плоскости отрезки, уменьшении величины и глубины зоны поверхностного упрочнения металла заготовок (сталь 10). Модели (10), (11), (12).

11. Круги с радиальной ориентацией зёрен обладают на 14 – 17% большей режущей способностью (в зависимости от наличия упрочняющих элементов и марки обрабатываемого материала), имеют более низкую температуру резания и на 20 – 30°C меньшую температуру прогрева металла заготовок в зоне отрезки, а также формируют менее выраженную зону поверхностного упрочнения. Круги с тангенциальной ориентацией зёрен имеют более высокий (на 25 – 30%) коэффициент шлифования и при работе потребляют на 5 – 17 % меньшую эффективную мощность.

12. Построенные математические модели позволяют прогнозировать и целенаправленно задавать требуемые эксплуатационные показатели отрезных кругов и качество обработки деталей за счёт изменения формы и ориентации зёрен.

13. В тех случаях, когда критерием эффективности отрезной операции является высокая производительность и качество обработки, целесообразно реко-

мендовать к использованию отрезные круги из зёрен с большими величинами коэффициентов формы и их радиальной ориентацией в теле инструментов. Когда же на первый план выходит критерий низкого расхода инструментов и когда резание сопровождается высокими силовыми нагрузками, следует рекомендовать к применению круги из зёрен с малыми коэффициентами формы и тангенциальной ориентацией в теле инструментов.

14. Экспериментальные отрезные круги прошли производственные испытания и внедрены на ряде предприятий, использующих абразивно-отрезные операции, где подтвердили свои преимущества по сравнению со стандартными инструментами. На эти же предприятия передана техническая документация для реализации и использования в производственных целях статического способа оценки прочности отрезных кругов. Результаты полученных исследований данной работы используются в учебном процессе для студентов машиностроительных специальностей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах(*):

1. *Петрушин С.И., Коротков В.А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов // Обработка металлов, 2005, №4, С. 16 – 18.*
2. *Коротков В.А. Стенд для испытаний отрезных шлифовальных кругов на механическую прочность // Обработка металлов, 2006, №2, С. 10 – 11.*
3. *Коротков В.А. Износ шлифовальных зёрен с разной формой // Обработка металлов, 2007, №1, С. 30 – 32.*
4. *Коротков В.А. Оценка формы площади поверхности шлифовальных зёрен в трёхмерном пространстве // Обработка металлов, 2007, №2, С. 27 – 29.*
5. *Коротков В.А. Тепловые явления при шлифовании отрезными кругами с контролируемой формой абразивных зёрен // Обработка металлов, 2007, №4, С. 28 – 29.*
6. *Коротков В.А. Анализ путей повышения эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов // Молодёжь Поволжья – науке будущего: Труды молодёжной науч.-практ. конф., 31.03 – 15.06.2003 г. – Ульяновск: УлГТУ, 2003, С. 3 – 4.*
7. *Коротков В.А. Совершенствование технологии изготовления отрезных шлифовальных кругов // Современные техника и технологии: Труды IX-ой международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 7 – 11 апр. 2003 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – Т.1, С. 213 – 214.*
8. *Korotkov V.A. Ways analysis operational characterization increase of the polishing wheels // Modern techniques and technologies (MTT 2003): Proceeding of the 9-th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists, April 7 – 11, 2003. – Tomsk, Russia, 2003, P. 102 – 103.*

9. Коротков В.А. Оценка разрывной прочности шлифовальных кругов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды II-й Всероссийской науч.-практ. конф., 29 – 30 апр. 2004 г. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2004. – Т.1, С. 122 – 123.
10. Коротков В.А. Изготовление экспериментальных отрезных шлифовальных кругов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: Труды III-й Всероссийской науч.-практ. конф., 19 – 21 мая 2005 г. – Юрга: Изд-во ТПУ, 2005. – Т.1, С. 31 – 32.
11. Коротков В.А. Оценка прочности шлифовальных кругов // Современные техника и технологии: Труды XI-ой международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 29 марта – 2 апреля 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – Т.1, С. 253 – 254.
12. Коротков В.А. Влияние формы зёрен на эксплуатационные показатели отрезных шлифовальных кругов // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: Материалы III международной науч.-практ. конф., 6 – 9 дек. 2005 г. – Тюмень: Феликс, 2005, С. 103 – 105.
13. Коротков В.А. Оценка формы шлифовальных зёрен // Современные техника и технологии: Труды XII-ой международной науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, 27 – 31 марта 2006 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – Т.1, С. 151 – 153.
14. Korotkov V.A. Technology and equipment for producing of the experimental cutting discs // Modern techniques and technologies (MTT 2006): Proceeding of the 12-th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists, March 27 – 31, 2006. – Tomsk, Russia, 2006, P. 177 – 179.
15. Коротков В.А. Способ испытания шлифовальных кругов на механическую прочность // Современные проблемы машиностроения: Труды III-й международной науч.-техн. конф., 27 – 30 ноября 2006 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – Т.1, С. 204 – 208.
16. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613051. Форма шлифовальных зёрен в объёме / Коротков В.А., Рылов Г.М. – № 2006612327; заявл. 4.07.2006; опубл. 1.09.2006.
17. Патент на изобретение 2292032 РФ, МПК⁷ G01N 3/58. Способ испытания шлифовальных кругов на механическую прочность / Коротков А.Н., Коротков В.А.; заявители и патентообладатели Коротков А.Н., Коротков В.А. – № 2005112954; заявл. 28.04.2005; опубл. 20.01.2007, Бюл. №2.
18. 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 (MTT 2007): Proceeding of the 13-th international scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientists, March 26 – 30, 2006. – Tomsk, Russia, 2007, P. 49 – 51.
19. Коротков В.А. Исследование влияния формы абразивных зёрен на прочность отрезных шлифовальных кругов на бакелитовой связке // Иннова-

- ционные технологии и экономика в машиностроении: Труды V-й Всероссийской науч.-практ. конф., 14 – 15 сентября 2007 г. – ЮТИ ТПУ, Юрга: Изд-во ТПУ, 2007, С. 264 – 271.
20. Коротков В.А., Фролов В.Е., Кустов Д.С. Исследование взаимосвязей формы и прочности ориентированных шлифовальных зёрен // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: Труды I-й Всероссийской науч.-практ. конф., 24 – 25 октября 2007 г. – Кемерово: Изд-во ГУ КузГТУ, 2007, С. 219 – 224.
21. Коротков В.А., Рылов Г.М., Гудин В.А. Исследование износа шлифовальных зёрен с разной ориентацией в теле инструмента // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: Труды I-й Всероссийской науч.-практ. конф., 24 – 25 октября 2007 г. – Кемерово: Изд-во ГУ КузГТУ, 2007, С. 215 – 219.
22. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612468. Площадь поверхностей и форма шлифовальных зёрен / Коротков В.А., Рылов Г.М. – № 2007611718; заявл. 02.05.2007; опубл. 13.06.2007.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610817. Износ шлифовальных зёрен / Коротков В.А., Рылов Г.М. – № 2007615417; заявл. 27.12.2007; опубл. 16.02.2008.

*(*курсив – для работ в журналах, входящих в перечень ВАК)*