Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»

На правах рукописи



Коротков Виталий Александрович

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

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

Диссертация на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант:
д-р техн. наук, профессор С. Н. Григорьев

2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….....7
Глава 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ.....17
1.1 Эксплуатационные свойства шлифовальных зёрен и изготавливаемых из них инструментов ..…….....17
1.2 Свойства компонентов шлифовальных кругов……...……...24
1.2.1 Марки шлифовальных зёрен и их характеристики…….……24
1.2.2 Разновидности связующих и наполнителей…….……35
1.2.3 Поры, как элемент структуры шлифовальных инструментов...…….…39
1.2.4 Упрочняющие элементы и их конструктивные особенности...…..……....40
1.3 Типовые технологии производства шлифовальных зёрен.……....43
1.4 Основные технологии производства шлифовальных кругов…….…….....47
1.5 Пути повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов технологическими способами……..…….48
1.6 Выводы по главе 1……..……...53
Глава 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН….....……55
2.1 Алгоритм создания и рационального применения абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен……....55
2.2 Способы оценки формы шлифовальных зёрен……..……56
2.3 Разделение шлифовальных зёрен по форме……....61
2.4 Взаимосвязь формы зёрен с площадью их поверхности и количеством в единице объёма……..65
2.5 Зависимость величин передних углов шлифовальных зёрен от факторов их формы, пространственной ориентации в теле инструмента и износа……...72
2.6 Методика и результаты оценки напряжённого состояния зёрен в процессе резания с учётом факторов их формы, пространственной ориентации и глубины заделки в связку……..87
2.7 Влияние формы и ориентации зёрен на их прочность…….101
2.8 Износ зёрен с разной формой и ориентацией…….....116

2.9 Выводы по главе 2……....126
Глава 3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ИЗ ЗЁРЕН С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ….....133
3.1 Типовая технология производства шлифовальных кругов на бакелитовой связке……..……..133
3.2 Изготовление шлифовальных кругов с заданной формой зёрен……..…135
3.2.1 Сепарация зёрен по форме и приготовление формовочных смесей……..135
3.2.2 Формование опытных шлифовальных кругов……..…138
3.2.3 Термообработка экспериментальных кругов…….……..141
3.3 Изготовление шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен…....143
3.3.1 Анализ способов ориентации зёрен в шлифовальных инструментах…...143
3.3.2 Предлагаемый способ ориентации зёрен и конструкции шлифовальных инструментов, изготавливаемые на его основе……146
3.3.3 Изготовление шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен…...153
3.4 Шлифовальные круги повышенной прочности…….……158
3.4.1 Анализ возможных путей повышения прочности шлифовальных кругов……158
3.4.2 Предлагаемый способ повышения прочности шлифовальных кругов и его реализация……...……...160
3.5 Выводы по главе 3…….165
Глава 4 ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗЁРЕН НА ПРОЧНОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ…….……...167
4.1 Анализ динамических методов оценки разрывной прочности шлифовальных кругов……...168
4.2 Стенд для прочностных испытаний шлифовальных кругов динамичес ким методом…….....170
4.3 Статический способ оценки прочности шлифовальных кругов…….…..173
4.4 Результаты оценки прочности шлифовальных кругов с заданной формой зёрен……182
4.5 Выводы по главе 4…….186

Глава 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЗЁРЕН НА ЭКСПЛУ-
АТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ….....190
5.1 Методика, оборудование и материалы для проведения испытаний
опытных шлифовальных кругов……...190
5.1.1 Методика проведения испытаний и обработка опытных данных……190
5.1.2 Оборудование и заготовки для проведения испытаний……194
5.2 Исследование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов
из зёрен 13AF30 с контролируемой формой при различных схемах
обработки…….199
5.2.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности
кругов из зёрен 13AF30 с заданной формой……...200
5.2.2 Коэффициент шлифования и эффективная мощность резания кругов
из зёрен 13AF30 с заданной формой……204
5.2.3 Общие затраты электроэнергии при шлифовании кругами из зёрен
13AF30 с заданной формой на различных схемах обработки……....211
5.2.4 Температура при резании, микротвёрдость и микроструктура заготовок,
а также шероховатость обработанных поверхностей после шлифования
кругами из зёрен 13AF30 с заданной формой……214
5.3 Исследование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов
из зёрен 53CF54 с заданной формой при различных схемах обработки…..…..221
5.3.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности
кругов из зёрен 53CF54 с заданной формой……...221
5.3.2 Коэффициент шлифования и эффективная мощность резания кругов
из зёрен 53CF54 с заданной формой……225
5.3.3 Общие затраты электроэнергии при шлифовании кругами из зёрен
53CF54 с заданной формой на различных схемах обработки……...231
5.3.4 Шероховатость обработанных поверхностей после шлифования
кругами из зёрен 53CF54 с заданной формой……....…233
5.4 Исследование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов
повышенной прочности с заданной формой зёрен у посадочного отверстия...237

5.4.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности шлифовальных кругов повышенной прочности……..237
5.4.2 Коэффициент шлифования и эффективная мощность резания шлифовальных кругов повышенной прочности, энергозатраты на обработку..239
5.4.3 Температура при резании, микротвёрдость и микроструктура заготовок после обработки кругами повышенной прочности……..…..244
5.5 Взаимосвязь эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с величинами передних углов и прочностью шлифовальных зёрен……..248
5.6 Выводы по главе 5…….…250
Глава 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ЗАДАННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН…….258
6.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен……..…..259
6.2 Коэффициент шлифования, эффективная мощность резания, составляющие силы резания P_y и P_z и их соотношения у шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен…….……...……...264
6.3 Температура при резании, микротвёрдость и микроструктура заготовок, а также шероховатость обработанных поверхностей после шлифования кругами с заданной ориентацией шлифовальных зёрен.....……..276
6.4 Взаимосвязь эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с ориентированными зёрнами с величинами передних углов и напряжений в них, прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов на этапе проектирования……..……..289
6.5 Выводы по главе 6 и практические рекомендации…….…...294
ЗАКЛЮЧЕНИЕ…..……..304
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……...310
ПРИЛОЖЕНИЯ……...343
Приложение 1 Акт испытания и внедрения ООО ИК «Спецкомплектация» ...344
Приложение 2 Акт испытания и внедрения ООО «ВостокПолимерХим»…....345

Приложение 3 Акт производственных испытаний и внедрения ООО «Завод электротехнической аппаратуры».....347
Приложение 4 Сертификат о прохождении стажировки на фирме по производству шлифовальных инструментов«Rottluff » (Германия)…….…….350
Приложение 5. Программы для ЭВМ и Патенты Российской Федерации……351

ВВЕДЕНИЕ

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 рассеве 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 шкурок 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 возмож-

ного 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 нового отечественного абразивного инструмента из зёрен с заданной формой и ориентацией, который бы реализовывал концепцию максимального использования режущих возможностей каждого отдельного зерна и упорядочения внутреннего строения абразивного композита, что обеспечивает повышение эксплуатационных возможностей такого инструмента 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 реализации 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 раздельно 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 обрабатываемый материал в большинстве случаев либо вообще не производится, либо осуществляется опытным путём без привлечения теоретических разработок. Недостаточно исследованы и разработаны также во-

просы 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 абразивного инструмента 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, структурой 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. Проведение производственных испытаний и внедрение нового абразивного инструмента 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 значимость 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. Предпромышленном освоении производства нового абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен и внедрении его 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 управления параметрами 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 запатентованного 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 и 2025 гг., в Севастопольском государственном университете на кафедре «Технология машиностроения» в 2015 г., в Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университета на кафедре «Технология машиностроения» в 2015 г., в Национальном исследовательском Томском политехническом университета 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 университета на кафедре «Оборудование и автоматизация машиностроения» в 2008 и 2014 гг. Отдельные фрагменты работы заслушаны в институте «Institut fuer Werkzeugmachinen und Umformtechnick» 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 проиндексированы в ядре Web of Science, 9 публикаций – на английском языке в изданиях Scopus и Web of Science, 2 монографии, 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.

Глава 1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Эксплуатационные свойства шлифовальных зёрен и изготавливаемых из них инструментов

Изучению физико-механических и режущих свойств алмазных и абразивных инструментов и их компонентов посвящены работы Абидова Р.А. [19], Байкалова А.К. [25], Бакуля В.Н. [26, 205], Бокучавы Г.В. [29], Братана С.М. [30, 31], Ваксера Д.Б. [35, 36, 37], Васильева Н.Н. [182], Волского Н.И. [43], Глейзера Л.А. [47], Димова Ю.В. [75, 76], Евсеева Д.Г. [79, 80], Зайцева А.Г. [82, 83, 289, 291], Ивановой Т.Н. [86], Ильичёва Л.Л. [88], Ипполитова Г.М. [89], Карпова А.Б. [91], Кольцова В.П. [93], Короткова А.Н. [94, 95, 96, 97, 99, 101], Корчака С.Н. [164, 165], Кремня З.И. [167, 168], Кудасова Г.Ф. [169], Кудряшова Б.П. [170], Кулакова Д.М. [172], Курдюкова В.И. [174, 175, 176, 177], Лурье Г.Б. [180], Лубомудрова В.Н. [182], Маслова Е.Н. [185, 186, 187], Мишнаевского Л.Л. [191], Новосёлова Ю.К. [196, 197, 198, 199], Носенко В.А. [200, 201, 202, 203], Полтавец В.В. [222], Полянчикова Ю.Н. [223], Попова С.А. [227], Резникова А.Н. [3], Сальникова А.Н. [79, 80, 234], Саютина С.Г. [235, 236], Силина С.С. [249], Старкова В.К. [254, 255], Филимонова Л.Н. [258, 259], Худобина Л.В. [261, 262, 263, 264, 265, 266, 267], Шумячера В.М. [46, 229, 230, 276, 277, 278, 279], Якимова А.В. [280, 281, 282, 283], Янюшкина А.С. [284, 285, 286], Ящерицына П.И. [251, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293], Denger W. [294], Drössler H. [295], Leonesio M. [309], Malkin, S. [310], Opitz H. [311], Peklenik J. [312], Shaw M.C. [275, 313], Yoshikawa H. [189] и других известных отечественных и зарубежных учёных. В работах названных авторов исследована взаимосвязь физико-механических свойств абразивных материалов, марки зёрен, зернистости, типов связки, твёрдости, структуры, с эксплуатационными показателями шлифовальных инструментов – их режущей способностью, коэффициентом шлифования, износом, мощностью и температурой резания. Отмечается, что шлифовальные инструменты в общем случае представляют из себя компо-

зит, состоящий из нескольких компонентов, в число которых входят зёрна, связка и поры. Обоснованный подбор этих компонентов и их эксплуатационные возможности непосредственно влияют на работоспособность шлифовальных инструментов и эффективность процесса шлифования. В частности, все исследования указывают на специфику процесса шлифования, который, в отличии от резания лезвийными инструментами, является результатом группового микрорезания отдельными зёрнами. Эффективность такого процесса зависит от результатов работы каждого единичного зерна – чем интенсивнее и с большей отдачей оно работает, тем выше работоспособность инструмента в целом и, соответственно, выше производительность и качество обработки.

Это обстоятельство выдвигает среди компонентов шлифовальных инструментов на первый план роль и значимость зёрен, как микрорежущих элементов, от которых в первую очередь зависят эксплуатационные возможности изготавливаемых из них инструментов.

Сравнение длины пути резания зерна, которому придана некая клинообразная форма и которое закреплено на оправке с фиксированной геометрией, с обычными зёрнами, находящимися в теле инструмента показывает, что в первом случае результат на порядок выше [178, 179, 224]. Следовательно, потенциальные режущие возможности зёрен намного превышают то, что они демонстрируют в существующих инструментах. Этот своеобразный резерв возможностей может составлять до 80÷90 % от максимальных показателей.

Причинами относительно низкой работоспособности зёрен является ряд факторов с различной степенью значимости. В их числе: слабое взаимодействие со связкой и её невысокое качество, склонность зёрен к хрупкому разрушению под влиянием действующих нагрузок, сложность и непредсказуемость характера протекания износа, наличие в зёрнах дефектов, их произвольная форма и хаотичное расположение в связке и др.

Раздельный анализ перечисленных причин показывает, что даже при наличии зёрен с высокими эксплуатационными показателями работоспособность инструментов в целом может оказаться низкой, если в них использована

связка с низкими потребительскими свойствами. Такие связки характеризуются наличием слабой адгезии с зёрнами, в них зёрна удерживаются путём защемления, отсутствует реакционная зона с переплавленным материалом зерна и связки (для керамических связок) и т.д. [89, 169, 178, 182].

Создание и подбор эффективных связок, которые бы фиксировали зёрна в теле инструментов так, чтобы они максимально раскрывали свои режущие возможности – это большая и сложная задача, требующая своего отдельного изучения [4, 49, 174].

Шлифовальные зёрна изготавливают из абразивных и сверхтвёрдых (алмаз, эльбор) материалов, которые, в отличие от металлических инструментов, относятся к хрупким телам и имеют хрупкую природу разрушения, что накладывает существенный отпечаток на их поведение в процессе воздействия силовых нагрузок. В частности, это приводит к тому, что износ зёрен, как микрорежущих клиньев, протекает гораздо сложнее, чем износ лезвийных инструментов. Так, для зёрен свойственны такие стадии износа, как износ по площадке, откалывание от зёрен мелких осколков, вырыв зёрен из связки целиком, объёмное разрушение зёрен. Названные стадии могут протекать по отдельности, переходить одна в другую или проходить совместно – зависит от конкретных условий шлифования и физико-механических свойств зёрен [178, 233, 258, 260, 311].

Важное влияние на процесс микрорезания зёрнами оказывает их прочность [1, 48, 74], которая зависит от ряда показателей: свойств абразивного материала, формы зёрен и расположения относительно действующей силы резания, наличия в зёрнах дефектов типа трещин и др. Прочные зёрна, как правило, более эффективно срезают материал, чем зёрна склонные к разрушению и раскрашиванию.

Как важный параметр прочность зёрен целесообразно каким-либо образом измерять. В этой связи анализ существующих методов оценки прочности зёрен показывает, что они лишь частично учитывают реальные условия нагружения зёрен и на выходе дают некую отвлечённую прочностную характеристику. Она позволяет производить по этому параметру относительное сравнение зёрен раз-

ных марок между собой, но не даёт ответа, как поведут себя зёрна, имеющие определённую форму и ориентацию в инструменте при воздействии на них силы резания с конкретным направлением вектора действия [84, 90, 97, 100]. Этот вопрос требует дальнейшей проработки.

Исследование шлифовальных зёрен разных марок показывают, что их внутренняя структура характеризуется наличием дефектов типа трещин разной длины и направленности, которые являются следствием растрескивания остывающего слитка абразивного материала, и привнесением этих дефектов в зёрна в ходе операции дробления слитков [4, 28, 188, 189]. Трещины разупрочняют зёрна и добавляют элемент нестабильности в их работу, когда зерно из прочного абразивного материала, благоприятно сориентированного к вектору действующей нагрузки, тем не менее, вместо длительной работы, при воздействии силы легко раскалывается на части из-за наличия трещин, инициирующих разрушение даже при минимальных усилиях резания. Это влияние тоже требует своего изучения. Следует отметить, что исследования в этом направлении показывают, что не всегда наличие трещин в зерне является негативным явлением. Оказывается, что если число трещин велико и они образуют своеобразную сеть, пронизывающую зерно, то это благоприятно сказывается на общей прочности зерна, препятствуя развитию в нём глобальной разрушающей трещины и способствуя процессу самозатачивания зерна путём откалывания от него по линиям сетки трещин мелких частей [48, 87].

Многие авторы отмечают, что форма зёрен оказывает непосредственное влияние на их эксплуатационные показатели и работоспособность инструментов в целом [82, 101, 183, 185, 192, 313]. Придать зерну определённую форму можно двумя путями – за счёт выделения зёрен с той или иной формой из общей массы дроблёного абразива [89, 169, 180] или путём изготовления зёрен с требуемой формой, например, сферо- и формокорундов [3, 4, 5]. Основная масса зёрен, используемых для изготовления шлифовальных инструментов, производится по типовой технологии получения и дробления абразивных слитков, имеет произвольную форму, колеблющуюся в широком диапазоне от изомет-

рических до игольчато-пластинчатых разновидностей. Именно такие зёрна с неконтролируемой формой присутствуют практически во всех шлифовальных инструментах и формируют недостатки, связанные с вариабельностью их геометрии. Второй путь – изготовление зёрен с заданной формой находится пока в стадии становления и характеризуется неотработанной и более затратной технологией изготовления. Инструменты из сферо- и формокорундов тоже требуют дополнительной доработки. Так, круги из сферокорунда, из-за малой прочности зёрен, изготавливаемых в виде пустотелых сфер, нашли пока результативное применение при обработке мягких материалов (резины, кожи и др.). Формокорунды в силу своей прочности успешно опробованы при обдирочном шлифовании, но требуется дальнейшая доработка в плане придания определённой ориентации этим зёрнам в инструментах [4, 5].

Перспективное и неожиданное направление развития получило применение сферокорундов в виде пустотелых сфер не в качестве зёрен, а в качестве искусственных пор. С их помощью стали улучшать структуру инструментов и изготавливать высокопористые круги [174, 255], обладающие высокой производительностью и пониженной температурой шлифования.

Проблема неупорядоченности формы зёрен связана с рядом сопутствующих тем, в числе которых: идентификация формы зёрен, способы разделения абразивной массы на фракции с одинаковой формой зёрен, изучение влияния формы зёрен на их эксплуатационные показатели (режущая способность, прочность, износ, стойкость).

Авторы многих исследований отмечают, что пока отсутствует единая и общепризнанная методика оценка формы зёрен. В некоторых источниках (особенно давнего опубликования) [37, 89, 169, 180, 182] сообщается, что форма зёрен может быть интерпретирована словесными терминами: зёрна изометрические, осколочные, мечевидные, пластинчатые, иглообразные и др. В других работах говорится о том, что более правильной и точной является количественная оценка формы зёрен путём соотношения и численного сравнения длин их осей с каким-либо геометрически правильным телом (эллипсом, параллелепипедом,

окружностью) [3, 82, 101]. Процедура количественной оценки формы зёрен, как правило, является трудоёмким, длительным и ручным процессом без использования возможностей ЭВМ, поскольку связана с применением микроскопов и статистической обработкой большого количества опытных данных для обеспечения достоверности результатов. Так, в нормативных документах на алмазные зёрна предписано производить оценку их формы посредством диапроектора через коэффициент формы, равный отношению длины к ширине зерна, исследуя при этом не менее 50÷100 зёрен из фракции [61, 62, 63].

Разделение зёрен на фракции с одинаковой формой может быть осуществлено путём сепарирования в воздушном потоке, в потоке жидкости, путём скатывания с наклонных плоскостей, вибрационным и электростатическим способами [7, 8, 9, 17, 19, 20, 21, 34, 270]. Выбор способа зависит от требуемой производительности и тщательности рассева. Так, с помощью сепарации зёрен в струе воздуха можно за короткий промежуток времени разделить значительную исходную массу абразива (десятки и сотни килограммов) на 2÷4 фракции. Но это будет неточное разделение с присутствием в каждой фракции зёрен сходных разновидностей форм. Вибрационное и электростатическое разделение абразивных частиц по форме менее производительно, но позволяет получить до 10÷14 фракций зёрен с достаточно чёткими границами деления на те или иные конфигурации [16, 207, 213].

Изучение влияния формы и геометрии зёрен на их эксплуатационные показатели посвящены многие работы [25, 82, 83, 187, 192, 313]. Исследования прямо или косвенно подтверждают, что такая связь несомненно есть, её влияние велико как на работоспособность инструментов, так и на все аспекты процесса шлифования. Поэтому требуется дальнейшее углубленное изучение этих взаимосвязей, открывающих перспективу повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов.

В числе главных условий эффективности работы зёрен входит, при прочих равных условиях, обладание ими благоприятной, для данного случая шлифования, геометрией. Геометрия режущей части зерна определяется двумя фак-

торами – формой и расположением в теле инструментов. Анализ существующей информации по вопросу ориентации зёрен показывает, что число работ, направленных на эту тему, относительно невелико и их количество уступает исследованиям формы зёрен. Причина неразработанности данной тематики лежит, видимо, в сфере сложности её практического освоения, т.к. ориентировать каждое зерно в инструменте в требуемом направлении представляет собой довольно затруднительную техническую задачу. Известны подходы к её решению путём металлизации зёрен и последующим использованием магнитного поля для их ориентации, а также на основе использования магнитной жидкости, экструдирования смеси зёрен со связкой через фильеры, использования электростатического эффекта [6, 11, 12, 13, 14, 15, 18].

Большая часть перечисленных подходов не получила широкого промышленного внедрения в связи со сложностью их реализации, нестабильным и невысоким итоговым результатом. Вместе с тем, положительную известность и распространённость получила технология электростатической ориентации зёрен на шлифовальных шкурках и лентах, когда зёрна своими острыми вершинами ориентируются электростатическим полем перпендикулярно к основе [206]. Работоспособность шкурок и лент в этом случае намного возрастает. Этот пример показывает перспективность развития данной тематики и возможность получения аналогичных результатов и для других распространённых инструментов (например, кругов).

Эксплуатационные свойства зёрен, как главного действующего компонента шлифовальных инструментов, непосредственно влияют на их работоспособность. Так, способность зёрен срезать микростружку, зависящая от их формы и ориентации, формирует режущую способность всего инструмента [3, 88, 183, 192]. Прочность зёрен, также связанная с их формой и ориентацией, влияет на прочность шлифовальных кругов и, как следствие, на допустимую скорость шлифования и возможность работать при высоких силовых нагрузках [194, 228, 231, 258].

Упорядочение формы и ориентации зёрен может дать ещё один положительный эффект – упорядочение внутреннего строения шлифовальных кругов и, как следствие, повышение их прочности и допустимой скорости шлифования.

Большой вклад в изучение работоспособности шлифовальных инструментов и их компонентов внесён учёными и выпускниками кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» («Резание материалов») МГТУ «СТАНКИН» [1, 41, 48, 49, 84, 88, 91, 97, 174, 255]. Развитие данного направления было впоследствии продолжено на кафедрах «Металлорежущие станки и инструменты» КузГТУ [78, 97, 101, 141, 143, 166, 183, 268, 272, 300, 301, 305].

В следующих разделах более подробно описаны свойства компонентов шлифовальных кругов и типовые технологии получения из них готовой абразивной продукции.

1.2 Свойства компонентов шлифовальных кругов

В состав компонентов шлифовальных кругов в общем случае входят: шлифовальные зёрна, связка, наполнители (в т.ч. поры) и упрочняющие элементы [182, 205, 206].

1.2.1 Марки шлифовальных зёрен и их характеристики

Для изготовления абразивных шлифовальных кругов используются следующие материалы: нормальный, белый, хромистый, титанистый, хромотитанистый, циркониевый электрокорунды, монокорунд, сферокорунд, формокорунд, а также карбиды кремния (зелёный и чёрный). Далее представлены марки абразивных материалов, их химический состав, физико-механические и режущие свойства зёрен, а также геометрические параметры.

Нормальный электрокорунд (отечественные марки: 12А, 13А, 14А, 15А, 16А; зарубежные марки: А, NK, 5А, 10А) содержит 92÷95 % Al_2O_3 и небольшое количество шлака и примесей. Его получают в дуговых печах восстановительной плавкой шихты, состоящей из высокосортного боксита, малозольного угле-

родистого материала и железной стружки. Минералогическая основа бокситов – корунд (Al_2O_3, не менее 60 %) и гексаалюминат кальция $CaOAl_2O_3$.

Белый электрокорунд (отечественные марки: 22А, 23А, 24А, 25А, 16А; зарубежные марки: 38А, 42А, 89А, Е, SA, WA, EK) состоит из 98÷99 % корунда (Al_2O_3) и небольшого количества примесей в виде высокоглинозёмного алюмината натрия и других минералов. По химическому и физическому составам белый электрокорунд является более однородным, чем нормальный. Зёрна белого электрокорунда обладают высокой твердостью, прочностью и имеют острые режущие кромки.

Хромистый электрокорунд (отечественные марки: 32А, 33А, 34А; иностранные марки: 57А, 88А, 86А, 68А, 26А, RK) получают в дуговой электропечи путём плавки глинозёма с добавлением оксида хрома (до 2 %). Наличие хрома повышает механическую прочность у абразивных зёрен хромистого электрокорунда по сравнению с белым электрокорундом.

Титанистый электрокорунд (отечественная марка 37А) – это абразив, представляющий собой соединение оксида алюминия с оксидом титана (Al_2O_3 + TiO_2). Он отличается от нормального электрокорунда большей прочностью.

Хромотитанистый электрокорунд (отечественные марки: 91А, 92А, 93А, 94А; иностранные марки: ХА, 50А, PW, SK2) производят плавкой в электрических дуговых печах глинозёма или бокситового агломерата с добавлением легирующих элементов в виде оксидов хрома и титана. Массовые доли этих элементов составляют: 0,25÷0,75 % Cr_2O_3, 0,75÷3,5 % TiO_2. Легирование двумя элементами даёт возможность улучшить абразивные свойства этого материала.

Циркониевый электрокорунд (отечественные марки: 38А-3, 38А-4, 38А-5; зарубежные марки: ZF, ZS, FA, TA, DA) получают при плавке в электрической дуговой печи шихты, содержащей глинозём, чистую двуокись циркония (ZrO_2) или циркониевый концентрат (бадделеит) с содержанием до 60 % ZrO_2. От других электрокорундов этот материал отличается мелкокристаллической структурой и высокой прочностью.

Монокорунд (отечественные марки: 43А, 44А, 45А; иностранные марки:

32А, 17А, SA, 90А) получают в результате плавки боксита с сернистым железом и восстановлением. Кристаллизуется в виде монолитных изометрических кристаллов с гладкими гранями и острыми вершинами. Зёрна монокорундов обладают повышенной прочностью.

Сферокорунд (отечественная марка ЭС) получают из глинозёма путём распыления расплава струёй воздуха, инертного газа, либо за счёт литья расплава на вращающийся металлический диск, благодаря чему поток жидкого электрокорунда дробится на капли, которые под действием сил поверхностного натяжения принимают форму сфер (пустотелых внутри). В готовом материале содержится более 99 % Al_2O_3 и небольшое количество примесей. В связи с тем, что сферы пустотелые – они обладают малой прочностью и поэтому их используют в инструментах для обработки мягких и вязких материалов – кожи, резины, пластмасс, цветных металлов, а также в виде пор для высокопористых абразивных инструментов.

Формокорунд (отечественные марки: ФС, А3С1, А3С2, А3С2, А3Р1, А3Р2, А3Р3) получают методом экструдирования специально подготовленной шихты с последующим спеканием при температуре 1700 °С. Содержание Al_2O_3 в формокорунде составляет 80÷87 %, Fe_2O_3 – не более 1,5 %. Зёрна формокорунда выпускают цилиндрической (С) и призматической (Р) форм с размерами: диаметр или размер квадратного сечения – 1,2÷2,8 мм, длина – 3,8÷8 мм. Зёрна обладают высокой прочностью и хорошей самозатачиваемостью.

Карбид кремния представляет собой химическое соединение кремния с углеродом (SiC). Его получают в электрических печах сопротивления силицированием частиц углерода парами кремниевой кислоты. Сырьем для получения SiC служат материалы с большим содержанием кремнезёма: кварц, кварцевый песок и кварциты, имеющие 99,0÷99,5 % SiO_2 и углеродистые материалы – нефтяной кокс и антрацит. По химическому составу зелёный и чёрный карбиды кремния отличаются незначительно, однако зелёный карбид кремния содержит меньше примесей, имеет повышенную хрупкость и большую абразивную (режущую) способность.

Отечественные марки карбида кремния чёрного: 53С, 54С, 55С; иностранные марки: С, 55С, 37С, SKS, ВС. Отечественные марки карбида кремния зелёного: 63С, 64С; иностранные марки: 39С, 1С, DC, SKG, CW.

Физико-механические и режущие свойства перечисленных абразивных материалов представлены в таблице 1.1 [3, с. 8], [4, с. 21], [205, с. 12], [206, с. 41].

Таблица 1.1 – Физико-механические и режущие свойства абразивных материалов, используемых для изготовления шлифовальных кругов

Абразивный материал	Микротвёрдость, ГПа	Плотность, г/см^3	Абразивная способность	Насыпная масса, г/см^3, зёрна № 40	Теплостойкость, °С	Прочность, Н, зёрна № 25
Нормальный электрокорунд	18,9÷19,6	3,9±0,05	0,145	1,87±0,05	1700÷1800	8,8÷10,7
Белый электрокорунд	19,6÷20,9	3,95±0,05	0,155	1,83±0,05	1700÷1800	8,8÷10,4
Хромистый электрокорунд	20,0÷22,0	3,95±0,05	0,101	1,89±0,05	1700÷1800	10,3÷10,8
Титанистый электрокорунд	20,0÷23,0	3,95±0,05	0,112	1,80±0,05	1700÷1800	10,3÷10,8
Хромотитанистый электрокорунд	19,6÷22,6	3,95±0,05	0,107	1,89±0,05	1750÷1850	10,3÷10,8
Циркониевый электрокорунд	22,6÷23,5	4,10±0,05	–	1,92±0,05	1900÷2000	589*
Монокорунд	23,0÷24,0	3,97±0,03	0,150	1,91±0,05	1700÷1800	11,7÷13,7
Сферокорунд	20,0÷21,0	3,95±0,5	–	0,94±0,05	1700÷1800	1,0÷4,0
Формокорунд	18,9÷19,6	4,00±0,5	–	1,90±0,05	1250÷1300	–
Карбид кремния чёрный	32,4÷35,3	3,2±0,5	0,400	1,48±0,05	1300÷1400	11,0÷14,7
Карбид кремния зелёный	32,4÷35,3	3,2±0,5	0,450	1,54±0,05	1300÷1400	11,0÷14,7

* прочность оценивалась на циркониевых зёрнах зернистостью 125 (F16).

Из таблицы 1.1 видно, что абразивная способность карбидов кремния в 2,5÷3,0 раза выше, чем у любого из электрокорундов. Среди представленных марок электрокорундов несколько большей абразивной способностью обладает белый электрокорунд. Карбиды кремния также обладают более высокой механической прочностью, чем электрокорунды (за исключением циркониевого электрокорунда). Циркониевый электрокорунд обладает очень высокой прочностью, поэтому, кроме отрезки, используется преимущественно на обдирочных операциях на станках с повышенной мощностью.

К геометрическим параметрам шлифовальных зёрен можно отнести их размер (зернистость), форму, величину углов резания, микрорельеф поверхности, наличие и величину дефектов в кристаллической структуре и другие параметры, отражающие линейные, угловые, объёмные, размерные характеристики зёрен.

Зернистость отечественных абразивных материалов регламентируется по ГОСТ 3647–80 [60], согласно которому все зёрна поделены на следующие группы: шлифзёрна (обозначение зернистости по ГОСТ 3647–80: 200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16; аналоги по ISO 8486–1: F10, F12, F16, F20, F24, F30, F36, F46, F54, F60, F70, F90), шлифпорошки (обозначение зернистости по ГОСТ 3647–80: 12, 10, 8, 6, 5, 4; аналоги по ISO 8486–1 и ISO 8486–2: F100, F120, F150, F180, F220, F230), микрошлифпорошки (обозначение зернистости по ГОСТ 3647–80: М63, М50, М40, М28, М20, М14; аналоги по ISO 8486–2: F230, F240, F320, F400, F500, F600), тонкие микрошлифпорошки (обозначение по ГОСТ 3647–80: М10, М7, М5; аналоги по ISO 8486–2: F800, F1000, F1200).

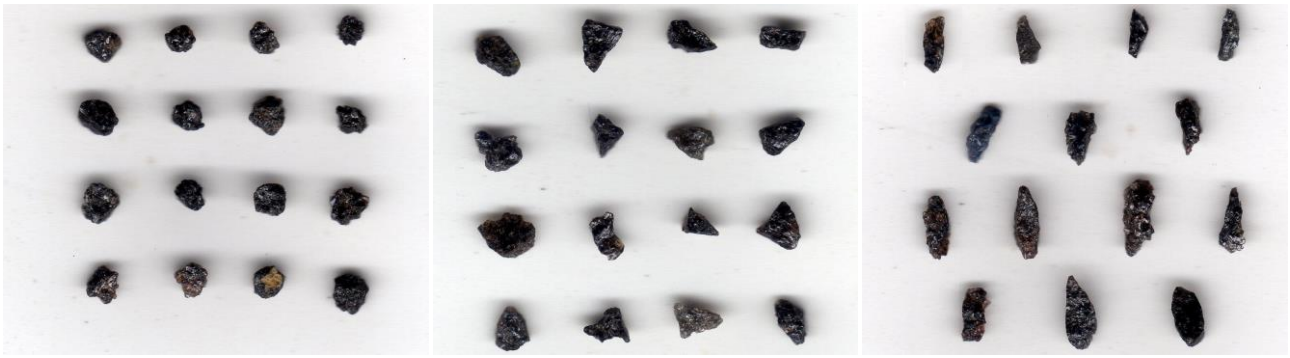
Размеры шлифовальных зёрен и шлифпорошков по ГОСТ 3647–80 изменяются в диапазоне от 2500÷1600 мкм (зернистость №200) до 50÷28 мкм (зернистость №4). Для кругов иностранного производства, согласно стандартам ISO и FEPA применяются зернистости с номерами от F4 до F220 (размер зёрен варьируется от 5600÷3350 мкм до 75÷45 мкм соответственно). Следует отметить, что в качестве частичной замены ГОСТ 3647–80, в части, относящейся к шлифовальным зернам и шлифпорошкам, введён ГОСТ Р 52381–2005 [58], положения которого в основном соответствуют стандартам ISO 8486–1 и ISO 6344–2.

Для отечественных абразивных отрезных кругов на бакелитовой связке чаще используют номера зернистостей от 160 (F12) до 5 (F220), а для кругов на вулканитовой связке – номера от 50 (F36) до 6 (F180). У кругов иностранного производства более распространены зернистости от F16 (125) до F60 (25).

Сферо- и формокорунды в Российской Федерации преимущественно находятся в стадии опытной разработки и внедрения, поэтому в больших объёмах для изготовления шлифовальных кругов пока не используются.

Форма всех остальных известных марок зёрен произвольно меняется в широком диапазоне разновидностей и зависит от их химсостава, физико-механических свойств и способов изготовления [3, 82, 169, 186, 187, 313].

Для идентификации формы зёрен используют качественную и количественную классификации. Качественная классификация (рисунок 1.1) основана на описании формы зёрен следующими общепринятыми терминами: зёрна изометрические, осколочные, промежуточные, пластинчатые, мечевидные, игловидные.



а) *б)* *в)*

Рисунок 1.1 – Разновидности форм шлифовальных зёрен
(абразив – нормальный электрокорунд марки 13А зернистостью 200Н (F10)):
а) – изометрические, *б)* – осколочные, *в)* – игольчато-пластинчатые зёрна

Качественная классификация субъективна, неточна и даёт приблизительное описание форме зёрен. Количественная классификация дает более точную и объективную оценку форме зёрен. Известен ряд методик, где форму зерна оценивают через коэффициент формы, равный отношению наибольшей и наименьшей сторон описанного прямоугольника (на плоскости) или параллеле-

пипеда (в объёме). Согласно ГОСТ Р 52370-2005 [63] алмазное зерно считается изометрическим, если соотношение его размеров в трёх взаимно перпендикулярных проекциях находится в диапазоне (1÷1,3):(1÷1,3):(1), удлинённым (иглообразным) при соотношении размеров (1,3÷3):(1):(0,33÷0,95), пластинчатым при соотношении (1÷3):(1):(0,05÷0,33). Форма алмазных зёрен, наряду с прямоугольником (ГОСТ 9206-80 [62]), может выражаться эллипсоидом вращения, через коэффициент формы, равный отношению его диагоналей [3, с. 28].

Как показывает практика, форма зёрен может быть количественна оценена коэффициентом формы ($K_ф$), равным отношению диаметров окружностей, описанных ($D_{оп}$) и вписанных ($D_{вп}$) в плоскую проекцию зёрен [101, с. 73]:

$$K_ф = D_{оп}/D_{вп} \quad (1.1)$$

Анализ формы зёрен различных марок и зернистостей, с точки зрения данной количественной классификации представлен в таблице 1.2 [101, с. 76].

Таблица 1.2 – Распределение по форме общей массы свободных абразивных зёрен различных марок и зернистостей

Коэффициент формы		1,0÷1,4	1,4÷1,8	1,8÷2,2	2,2÷2,2	2,6÷3,0
Зернистость	Марка зёрен	Количество зёрен, %				
125 (F16)	13A	17	52	23	3	5
	NK*	1	32	38	17	12
	SKS*	5	17	27	26	25
80 (F24)	13A	14	49	31	5	1
	NK*	0	25	31	25	19
	EK*	1	30	37	22	10
40 (F46)	13A	8	56	23	5	8
	92A	3	44	41	7	5
	NK*	4	12	21	31	32
	EK*	5	18	19	17	41
	SKS*	3	17	25	25	30

* NK, EK, SKS – зёрна, соответственно, нормального, белого электрокорунда и карбида кремния чёрного (Германия).

Данные таблицы 1.2 показывают, что форма всех марок зёрен меняется в широком диапазоне от изометрических ($K_ф$ = 1,0÷1,4) до пластинчатых и иглообразных разновидностей ($K_ф$ = 2,6÷3,0). При этом каждая марка имеет свою

картину распределения по форме. В целом все эти картины, будучи нанесены на график, похожи на кривые распределения Гаусса или Вейбулла, имеющие колоколообразный вид. Причем, каждая марка зёрен имеет свой пик распределения, который для импортных электрокорундов NK и EK находится примерно посредине ($K_ф$ = 1,8÷2,2), а для отечественных марок 13А и 92А сдвинут в сторону изометрических зёрен ($K_ф$ = 1,4÷1,8). Что касается зёрен карбида кремния, то у них максимум распределения во всех случаях сдвинут в сторону пластинчатых и иглообразных зёрен ($K_ф$ = 2,6÷3,0). Это, видимо, следствие особенностей кристаллического строения данного абразивного материала и его склонности дробиться с образованием острых и удлиненных разновидностей зёрен.

Из таблицы 1.2 видно также, что с уменьшением зернистости растет количество пластинчатых и иглообразных зёрен, которые являются осколками от дробления крупных зёрен.

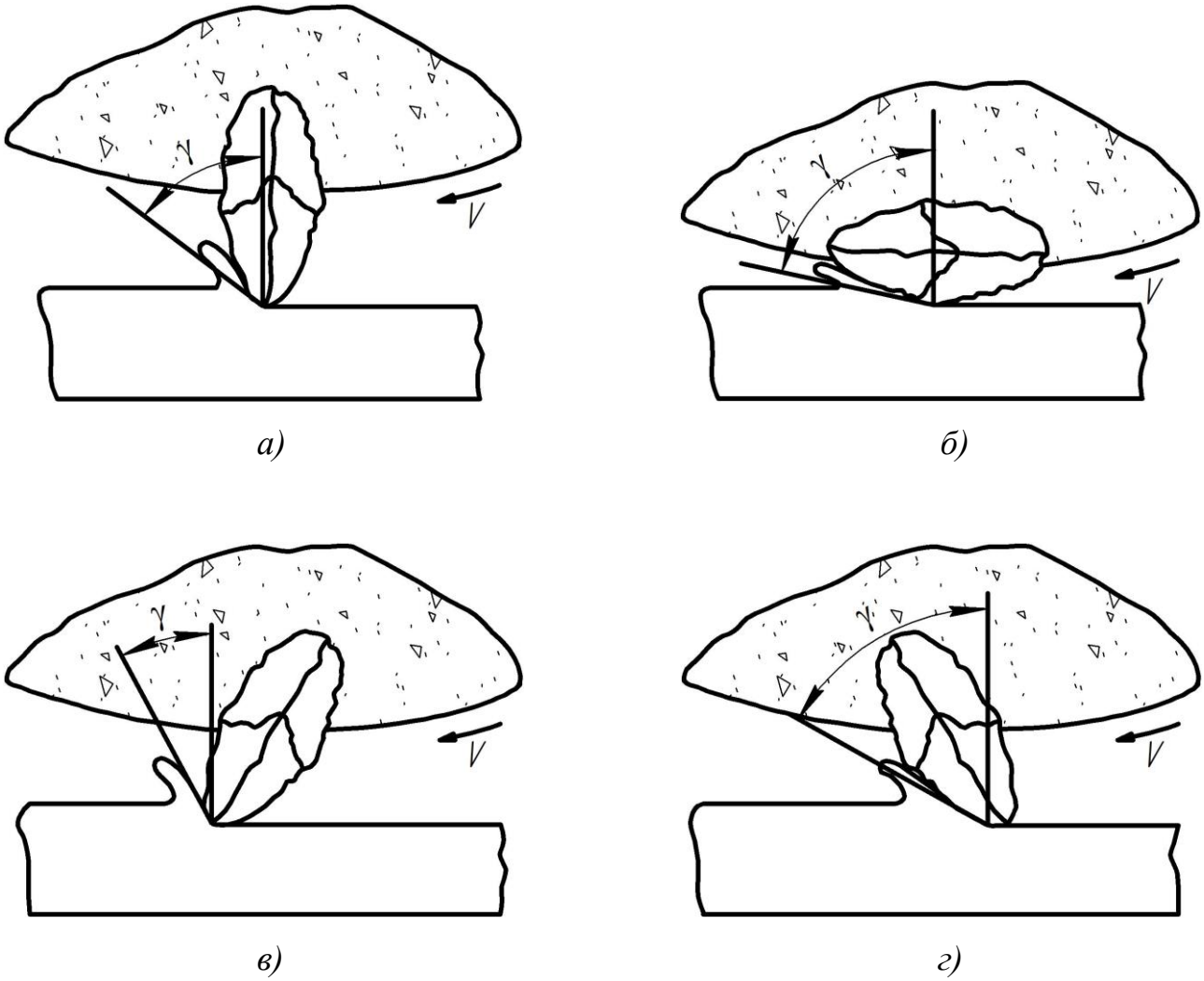
В основе наличия широкого разнообразия форм зёрен лежит специфика их кристаллического строения и особенности расщепления слитка абразивного материала в процессе его дробления для получения зёрен. Это видно, например, из таблицы 1.3 [37], где приведены данные по изменению формы шлифовальных зёрен одних и тех же марок абразивов в зависимости от способа их дробления. Из таблицы 1.3 следует, что способ дробления, кроме формы зёрен, оказывает ощутимое влияние на их прочность и геометрию режущей части.

Замечено также, что величины передних углов у зёрен в определенной степени зависят от номера их зернистости. В частности, известны исследования, из которых следует, что при уменьшении размера зёрен в пять раз величины их передних углов возрастают примерно на 10° (т.е. мелкие зёрна имеют более острые углы резания) [189]. Геометрия режущей части зёрен, помимо формы, задается также их конкретной ориентацией в теле инструмента. На рисунке 1.2 (*а, б, в, г)* показано шлифовальное зерно на рабочей поверхности инструмента (шлифовального круга) при различных характерных вариантах его пространственного расположения в теле инструмента и срезающее стружки с образованием в главной секущей плоскости отрицательных передних углов γ.

Таблица 1.3 – Влияние способа дробления абразивных слитков на механические свойства и геометрические параметры шлифовальных зёрен [37]

Способ дробления	Абразивный материал	Разрушаемость, %	Угол при вершине, ε	Радиус округления вершин, R, мкм	Форма зёрен: l:b:h
В валках	Нормальный электрокорунд	59	96	25	1,44:1,0:0,71
	Белый электрокорунд	58	96,5	23	1,44:1,0:0,68
	Карбид кремния чёрный	68	105	29	1,5:1,0:0,68
	Карбид кремния зелёный	64	95	14	1,58:1,0:0,71
На стержневой мельнице	Нормальный электрокорунд	75	99	19	1,44:1,0:0,72
	Белый электрокорунд	63	90	23	1,49:1,0:0,74
	Карбид кремния чёрный	64	111	32	1,37:1,0:0,71
	Карбид кремния зелёный	77	103	24	1,57:1,0:0,71
На бегунах	Нормальный электрокорунд	83,5	100	20	1,38:1,0:0,75
	Белый электрокорунд	86,5	95	27	1,44:1,0:0,76
	Карбид кремния чёрный	67	110	33	1,38:1,0:0,76
	Карбид кремния зелёный	75,5	113	34	1,63:1,0:0,70

Анализ рисунков 1.2, *а*, *б*, *в*, *г* позволяет сделать вывод о том, что ориентация зёрен в теле инструмента может существенно влиять на их геометрию. В особенности это касается пластинчатых и иглообразных зёрен. При выступании таких зёрен из связки острой частью они будут формировать небольшие (по модулю) отрицательные величины передних углов, а при выступании из связки плоской частью – образовывать значения передних углов близкие к -90°.



а) *б)*

в) *г)*

Рисунок 1.2 – Формирование переднего угла (γ) на зерне при его различной ориентации в инструменте: *а)* – радиальной; *б)* – тангенциальной; *в)* – вершиной навстречу P_z; *г)* – вершиной по направлению P_z

Кроме того, анализ показывает, что наиболее рациональным с точки зрения передних углов зёрен является вариант их расположения вершинами навстречу составляющей силы резания P_z (рисунок 1.2, *в*). Здесь передний угол зерна ближе всего к 0°. В то же время, ориентация зерна вершиной по направлению P_z (рисунок 1.2, *г*) является наименее эффективной, поскольку передние углы γ в рассматриваемом случае близки к варианту тангенциальной ориентации зерна. В дополнение к этому зерно находится в невыгодном положении относительно направления воздействующих нагрузок, что отрицательно сказывается на его прочности.

Наряду с макроформой (т.е. объёмной формой) и ориентацией зёрен, геометрия их режущей части формируется также наличием у режущего клина конкретного рельефа поверхности. Изучение поверхности зёрен под микроскопом показывает, что она состоит из мелких впадин, выступов, наслоений, резких или плавных переходов. Профиль режущего микроклина какого-либо зерна зависит от произвольного сочетания перечисленных элементов и трудно предсказуем. Показано [101, с. 84], что если сравнивать действительные длины контуров сечений зёрен в 3-х плоскостях с их теоретической длиной, подсчитанной для идеальных окружностей (для изометрических зёрен номинальных зернистостей с $K_ф$ = 1,0), то окажется, что реальные длины режущих контуров в 2,0÷2,5 раза больше теоретических. Установлена достаточно чёткая разница в средней длине режущих контуров зёрен разных марок абразивов с одинаковой зернистостью. Так, в частности, известно, что зёрна каждого абразивного материала имеют свою конкретную длину режущего контура, которая растёт в направлении от нормального электрокорунда (NK) к карбиду кремния чёрному (SKS) [101, с. 85]. Учитывая, что и режущая способность среди рассматриваемых абразивов растет в том же направлении, можно предположить, что она увеличивается не только благодаря изменению их физико-механических свойств, но и за счёт увеличения длины режущего контура.

Оценку развитости поверхности рельефа зёрен целесообразно вести не в абсолютных величинах (длинах режущего контура), которые привязаны к размерам зёрен (зернистости), а в относительных единицах [101]. Например, в виде коэффициента развитости поверхности ($K_р$), равного отношению описанной вокруг зерна окружности ($L_о$), к длине его реального контура ($L_к$):

$$K_р = L_о / L_к. \qquad (1.2)$$

Изучение рельефа поверхности зёрен с увеличением в 100÷300 раз (например, на растровом электронном микроскопе) показывает, что он включает различные элементы микрорельефа, к которым относятся: пластины (с размером 50÷80 мкм), чешуйчатые наслоения (15÷20 мкм), иглообразные выступы (4÷8 мкм). Кроме того, изучение микрошлифов зёрен, показывает, что их кри-

сталлическая структура содержит такие элементы (дефекты), как трещины разной длины и раковины разных размеров [101, с. 92]. Наличие перечисленных элементов, очевидно, также оказывает определенное влияние на прочностные и режущие свойства абразивных материалов. Уменьшение количества таких дефектов, например, за счет технологии изготовления монокорундов (без дробления абразива) позволяет ощутимо повысить микротвердость и прочность зёрен, а также стойкость шлифовальных инструментов [4].

1.2.2 Разновидности связующих и наполнителей

Для изготовления шлифовальных кругов применяют неорганические и органические связки. Далее описываются свойства этих связок [3, 4, 168, 206].

К неорганическим связкам относят керамические, металлические. магнезиальные и силикатные связки. Керамические связки представляют собой многокомпонентную смесь тонкодисперсных, измельчённых материалов, в числе которых: огнеупорная глина, полевой шпат, тальк, борные, бариевые или щелочные стёкла и др. При изготовлении инструментов на керамических связках для повышения пластичности и формуемости абразивных масс применяют клеящие вещества: растворимое стекло, декстрин, сульфитный щелок.

Адгезия керамической связки с зёрнами наиболее высокая, т.к. в процессе высокотемпературного обжига кругов (1000÷1250 °С) между ними образуется расплавленная переходная зона (реакционная зона).

Керамические связки способны к порообразованию, они устойчивы против воздействия воды и смазочно-охлаждающих жидкостей, обладают высокой теплостойкостью (1000÷1100 °С) и низкой теплопроводностью. Недостаток керамических связок – их хрупкость, которая не позволяет использовать эти связки при грубом шлифовании с неравномерным припуском и ударами. Основные марки отечественных керамических связок (по ГОСТ 2424–83 [57], ТУ 2–036–984–86, ТУ 3989–014–05748371–99 и ТУ 3989–043–00221847–2003):

– для инструментов на основе электрокорундов: К5, К15, К20, К43;

– для инструментов из зёрен карбида кремния: К3, К10;

– для эльбора (КС10, К27, К70) и алмаза (К1, К11).

Обозначение марок керамических связок по ГОСТ Р 52781–2007 [56] и стандартам ISO: V, Ke (у некоторых зарубежных производителей).

Металлические связки применяют для кругов из алмазов и других сверхтвёрдых материалов (например, – из эльбора). Они подразделяются на связки, спечённые по методу порошковой металлургии (из порошков меди и олова) и гальванические, получаемые электрохимическим способом (на основе никеля). Обозначения металлической спечённой связки – М, гальванической – Г (у иностранных фирм, соответственно, M и G).

Инструменты на магнезиальной связке (на основе магнезиального цемента) изготавливаются по относительно дешёвой технологии без термообработки, но имеют невысокую прочность и рабочую скорость (20÷25 м/с) [160, 161].

К органическим связкам относят бакелитовую (Б, B, BF), вулканитовую (B, R), глифталевую и эпоксидную и другие полимерные связки [4, 206, 298].

Бакелит представляет собой сочетание в различных пропорциях карболовой кислоты (фенола) C_6H_5OH и формальдегида, либо крезола C_6H_4. В зависимости от соотношения этих компонентов получают смолу, лак или порошкообразный бакелит (пульвербакелит). Пульвербакелит (связующее СФП – смола фенольная порошкообразная, ГОСТ 18694–2017 [67]) имеет гранулометрический состав с размером зёрен 63÷80 мкм, температуру плавления (105÷115 °С), содержит свободного фенола не более 5,5 % и обладает механической прочностью на разрыв не менее 13 МПа. Бакелит жидкий (БЖ), ГОСТ 4559–2017 [50] или смола фенольная жидкая (РС, СФЖ), ГОСТ 20907–2016 [66] представляет собой бурую жидкость с плотностью (1,10÷1,15) 10^3 кг/м^3, которая растворяется в спирте, ацетоне и фурфуроле [206, с. 124].

При нагревании (бакелизации), находясь в смеси с абразивным материалом, пульвербакелит сначала размягчается и равномерно обволакивает каждое абразивное зерно, а затем при температуре 160÷180 °С происходит его поликонденсация с образованием пластмассы.

Жидкий бакелит используют как увлажнитель при подготовке абразивной

смеси и он смешивается со шлифовальным зерном в определенной пропорции в зависимости от состава смеси (в пределах 5 %) и иногда заменяется на другие увлажнители (например, на фурфурол или ацетон).

Кроме жидкого и порошкообразного бакелита в состав будущей смеси для придания ей необходимых физико-механических и эксплуатационных свойств также могут входить наполнители: криолит, пирит, алебастр, гипс, антимонит, уротропин и др. Криолит способствует повышению прочности готового инструмента. Гипс (полуводный гипс) способствует порообразованию, уменьшает количество летучих веществ при бакелизации и ускоряет отверждение смолы при нагреве. Уротропин ускоряет процесс бакелизации.

В импортных отрезных шлифовальных кругах (например, производства немецкой фирмы «Rottluff») в состав абразивной смеси, помимо зёрен входят: 1. Пульвербакелит марки 9504 SP; 2. Пульвербакелит марки 8232G; 3. Пирит желтый; 4. Калиокриолит; 5. Красный оксид железа; 6. Полуводный гипс ($2CaSO_4 \cdot H_2O$); 7. Уротропин; 8. Бакелит жидкий марки SW436.

На ОАО «Юргинские абразивы» в рецептуры для изготовления кругов на бакелитовой связке входят: 1. Пульвербакелит СФП-012А (ГОСТ 18694); 2. Бакелит жидкий БЖ–3 (ГОСТ 4559) или РС1079 (ГОСТ 20907); 3. Криолит (ГОСТ 10561–80 [53]); 4. Пирит.

На ОАО «Лужский абразивный завод» в состав бакелитовой связки входят: 1. Пульвербакелит СФП-012А2-У12 (ТУ 2257-074-05015227–2002); 2. Бакелит жидкий БЖ–3А (ТУ 2221-067-05015227–2003).

Марки отечественных бакелитовых связок: Б, Б1, Б2, Б3, БУ (В, BF).

Вулканитовая связка представляет собой композит, основной компонент которого – синтетический каучук. Другими компонентами являются: вулканизирующий агент, ускорители вулканизации, наполнители и мягчители.

Вулканизирующим агентом является сера, в присутствии которой при температуре 160÷170 °С каучук становится твёрдым материалом. Для отрезных кругов используется тонкомолотая сера класса А по ГОСТ 127.1–93 [65], от количества которой зависит степень вулканизации. Для получения жестких и

твёрдых изделий вводят до 60 % серы. В качестве ускорителей, для сокращения времени вулканизации и повышения равномерности свойств связки, используют порошки каптакса, альтаков и тиурама в количестве 0,5÷3 %. Для повышения прочности и эксплуатационных свойств инструмента используют наполнители на основе окиси магния и цинка, а также соли и синтетические смолы. Мягчители используют для повышения формовочных свойств смесей, регулирования твёрдости изделия и повышения адгезии связки с зернами. Для этих целей могут применять следующие органические вещества: жирные кислоты, рубракс, полидиены, идитол и дибутилфталат.

Изготовление вулканитовой связки представляет собой процесс смешивания каучука с другими компонентами до однородного состояния на смесительных машинах. Связка смешивается в определенной пропорции со шлифовальными зёрнами, после чего осуществляется процесс формования кругов. Окончательные кондиции связка приобретает в результате вулканизации заформованных кругов в туннельных или камерных вулканизаторах и в автоклавах с давлением воздуха 0,5 МПа и температурой 160÷170 °С. Возможно совмещение операций формования и вулканизации путём ввода нагревательных устройств в оборудование для формования.

Марки отечественных вулканитовых связок: В, В1, В2, В3 (R).

Глифталевая связка изготавливается из глифталевой смолы и представляет собой продукт взаимодействия глицерина с фталевым ангидридом. Технология изготовления абразивных инструментов аналогично технологии изготовления инструментов на порошкообразном бакелите. Связка обладает относительно низкой теплостойкостью (120 °С против 200÷250 °С для инструментов на бакелитовой связке). Невысокая теплостойкость и твёрдость обуславливают её применение для процессов шлифования на скоростях не более 40 м/с в инструментах из карбида кремния зелёного.

Марки отечественных глифталевых связок: ГФ.

Эпоксидная связка изготавливается из эпоксидных смол, имеет характеристики, близкие к остальным органическим связкам, но используется для про-

изводства абразивных инструментов значительно реже [113]. К известным связкам этого типа относится поливинилформалевая связка марки ПФ.

1.2.3 Поры, как элемент структуры шлифовальных инструментов

Поры образуются в процессе изготовления шлифовальных инструментов в виде пустот, располагаемых в связке между зёрнами. Их положительная роль состоит в том, что они способствуют отводу тепла из зоны резания, подводу СОЖ и размещают срезаемую микростружку. Недостаток пор состоит в том, что они разупрочняют инструменты и являются концентраторами напряжений, способствующими снижению их допустимой рабочей скорости и стойкости. Размер обычных пор составляет 10÷50 мкм, а их количество в объёме инструментов, например, на керамических связках, может варьироваться в диапазоне 24÷49,5 % для твёрдостей ЧТ2(W)÷ВМ1(F) [89, с.77].

Для усиления положительного эффекта от наличия пор изготавливают специальные высокопористые инструменты, где поры образуются в результате выгорания или расплавления порообразующих наполнителей. Размер таких пор составляет 80÷1000 мкм, а общая пористость инструмента может достигать 54÷62 %. Поверхность трения высокопористого круга уменьшается до 4-х раз, что значительно уменьшает тепловыделение при шлифовании, а межзёренное пространство увеличивается в 2÷2,5 раза, что способствует размещению большого объёма стружки и предотвращает засаливание круга [168].

Существует также направление, сформированное на кафедре «Высокоэффективные технологии обработки» МГТУ «СТАНКИН», когда высокопористый инструмент создают путём введения в его структуру пустотелых сфер из электрокорунда (сферокорундов) или стеклянных микросфер [94, 99, 130, 170, 174, 175, 176, 254, 255, 304].

В техническом университете г. Кемнитц (Германия) проведены исследования по армированию внутренних стенок крупных пор высокопористых инструментов посредством нанесения тонких металлических плёнок [295].

1.2.4 Упрочняющие элементы и их конструктивные особенности

Повышение прочности шлифовальных инструментов позволяет увеличить их максимальные рабочие скорости и улучшить за счет этого ряд эксплуатационных показателей, например, производительность обработки, шероховатость обрабатываемых поверхностей и др. Повысить прочность инструмента можно путем подбора и улучшения свойств связки, применения мелкозернистых и низкопористых рецептур, импрегнированием (пропиткой) готовых инструментов упрочняющими составами, применением упрочняющих элементов. Наиболее распространёнными упрочняющими элементами для абразивных кругов являются армирующие сетки, металлические кольца (калибровочные втулки) и металлические диски. В качестве армирующих сеток в кругах на бакелитовых связках отечественной абразивной промышленностью используются стеклосетки типа СПАП, – сетки перевивочного плетения, армирующие, пропитанные связующим на основе бакелита. Свойства наиболее распространенных марок стеклосеток отражены в ТУ6-48-00205009-131–99 и ТУ6-48-122–94.

Стеклосетки могут использоваться для армирования шлифовальных кругов, изготавливаемых на бакелитовой связке, а также на других органических связующих, например на эпоксидных смолах. Сетки вырубают по размеру изготавливаемых кругов и укладывают при заполнении прессформы на равном расстоянии друг от друга в количестве от одной до четырёх и более в зависимости от высоты круга. В соответствии с техпроцессом, при наличии в круге нескольких сеток, они должны укладываться в формовочную смесь с угловым сдвигом относительно друг друга (при двух сетках, – на угол 45°). Делается это из-за того, что стеклосетки СПАП имеют квадратные ячейки и максимальная величина прочности на растяжение у них фиксируется при совпадении направления растягивающего усилия с расположением нитей. Наименьшей прочностью сетка обладает тогда, когда ее ячейки повернуты под углом 45° по отношению к вектору нагрузки [194, с. 96]. В этом случае ячейки сетки деформируются, принимая форму ромба, и выдерживают меньшую разрывную нагрузку. Таким обра-

зом, сетки максимально упрочняют круг только при расположении их нитей по направлению действия тангенциальных растягивающих напряжений, которые оказывают основное влияние на разрушение шлифовальных кругов при воздействии центробежной силы. Радиальные растягивающие напряжения в шлифовальных кругах в разы меньше тангенциальных напряжений, что соответствующим образом отражается на прочности кругов при их армировании в указанных направлениях. Как показывают исследования, наиболее оптимальным с точки зрения прочности кругов является концентрическое или радиально-кольцевое расположение нитей сетки [194, с. 98]. Несмотря на это, на практике по-прежнему используются стеклосетки типа СПАП с квадратной формой ячеек. Причина состоит в относительной дешевизне сеток данной конструкции. Несмотря на имеющиеся недостатки эффект от их применения является весьма существенным. В частности, армирование стеклосетками кругов на бакелитовых связках позволяет при прочих равных условиях повысить их рабочие скорости в 1,5÷2,0 раза с 50÷60 м/с до 80÷100 м/с и более.

Специфика упрочняющих элементов типа сеток состоит также в том, что они должны не только повышать прочность круга, но и не мешать срезать обрабатываемый материал. То есть они должны сгорать или изнашиваться при работе круга без отрицательных последствий для процесса резания. В связи с этим возможность применения в шлифовальных кругах, например, сеток на основе металлических нитей ограничивается зоной вблизи посадочного отверстия кругов Более перспективным здесь представляется применение для сеток материалов, близких по комплексу физико-механических свойств к стекловолокну, при этом превосходящих последнее по пределу прочности на растяжение. И такой материал был найден. Опыт применения в шлифовальных кругах на эпоксидной связке ткани на основе карбонового волокна в качестве замены стеклосеток показал, что указанное техническое решение позволяет повысить скорость разрыва кругов со 104 до 139 м/с и увеличить их максимально допустимую рабочую скорость с 55 до 80 м/с, и достичь тем самым соответствующих показателей инструментов на бакелите, армированных стеклосетками [301].

Потенциальное применение сеток и тканей на основе карбонового волокна в шлифовальных кругах на бакелитовых связках открывает перспективы дальнейшего повышения прочности, рабочей скорости и других эксплуатационных показателей этих инструментов. Перспективность этого направления исследований подтверждается, например тем, что в авиастроении происходит успешная замена композитных материалов на основе стекловолокна на материалы на основе карбонового волокна (обшивка и несущие элементы планеров самолетов) [248]. Карбоновое волокно обладает прочностью на растяжение, превосходящей стекловолокно до 2-х и более раз. Недостатком карбона на данный момент является его существенно более высокая стоимость по сравнению со стекловолокном.

Калибровочные втулки в шлифовальных кругах (например, в отрезных и обдирочных) служат двум целям: обеспечению стабильного размера посадочного отверстия, который может измениться при термообработке круга, и повышению разрывной прочности инструмента. Последнее достигается благодаря тому, что втулка, находясь в зоне центрального отверстия, препятствует возникновению и развитию трещины, инициирующей разрыв круга при его вращении. Установлено, что максимальные тангенциальные напряжения, вызывающие разрыв круга при вращении, возникают именно на краю посадочного отверстия. Поэтому упрочнение зоны вблизи посадочного отверстия положительно сказывается на прочности шлифовального круга в целом [182, 194, 258, 273]. Калибровочные втулки вырубаются из тонколистовой жести и имеют, как правило, несколько отверстий вдоль своего периметра и отбортовку на посадочном диаметре. Отверстия по периметру втулки делаются пробойником с образованием острых краев выступающего металла с обратной стороны отверстий. Эти выступы служат для дополнительного крепления втулки в абразивной массе и предотвращают её от проворачивания на готовом изделии. Отбортовка делается на величину высоты круга и необходима для того, чтобы шпиндель станка или шлифмашинки соприкасался с металлом, а не с абразивной массой круга. Втулка кладется в прессформу последней перед формованием инструмента.

В некоторых конструкциях шлифовальных кругов в качестве армирующих элементов могут использоваться металлические кольца, которые располагают в теле круга в зоне его посадочного отверстия, а также металлические диски, наклеенные на торцы круга в зоне посадочного отверстия [258, с. 104].

1.3 Типовые технологии производства шлифовальных зёрен

Техпроцесс производства электрокорундов [3, 4, 169, 182, 206] представляет собой электротермический процесс, при котором в дуговых электрических печах методами плавки «на блок» и «на выпуск» из исходной алюмосодержащей руды (боксита) получают абразивный материал и сопутствующий продукт (ферросплав). Перед плавкой бокситы проходят предварительную прокалку (кальцинацию) для удаления влаги или агломерацию (высокотемпературное спекание с восстановлением). При плавке бокситов происходит расплавление всех шихтовых материалов, идут сложные процессы восстановления окислов железа, кремнезёма и титана, осуществляется кристаллизация наплавленного продукта. Наплавление блока электрокорунда при мощности печи 4500 кВ·А длится 16÷18 ч. Температура плавления составляет порядка 2000 °С. Затем происходит доводка расплава в течение 3÷6 ч. По окончании плавки блок электрокорунда помещается в остывочную камеру на 8÷10 ч. Далее он транспортируется мостовым краном на эстакаду, где окончательно остывает в течение 2÷2,5 суток. Остывший блок разбивают копрами на куски, которые сортируют по крупности и отбраковывают фрагменты шлака и ферросилиция.

При плавке электрокорунда методом «на выпуск» готовый расплав периодически выпускают из печи в изложницы с массой слитка электрокорунда 15÷20 т. В остальном техпроцесс подобен изготовлению слитков «на блок».

Производство электрокорундов различных марок имеет общую технологическую основу, различие состоит в подготовке исходной массы шихты и наличии легирующих добавок. Известны также технологии производства электрокорундов, отличающиеся особенностями разлива готового расплава с его

ускоренным охлаждением и кристаллизацией. В частности расплав электрокорунда могут разливать в мелкие изложницы и получать слитки массой порядка 100÷200 кг. По другой технологии расплав электрокорунда льют в пространство между двух вращающихся валков-кристаллизаторов, охлаждаемых прокачиваемой водой [55]. Валки-кристаллизаторы, как и мелкие изложницы, значительно ускоряют процесс остывания жидкого электрокорунда и упрощают процесс последующего дробления слитков и пластин. Ускоренная кристаллизация приводит к появлению в структуре слитка сетки микротрещин, способствующих получению при его дроблении зёрен преимущественно игольчато-пластинчатых форм. Зарубежные и отечественные производители абразивов используют подобные технологии для изготовления зёрен, применяемых в шлифовальных шкурках и маркируют их зернистости с добавлением буквы Р (ГОСТ Р 52381–2005 [58]).

Технологический процесс производства карбида кремния основан на электротермическом восстановлении кремнезёма углеродом при температуре 1500÷1900 °С. В качестве сырьевых и вспомогательных материалов при производстве карбида кремния используют: кварцевое сырьё, антрацит, поваренную соль, древесные опилки. Карбид кремния изготавливают в подвижных или стационарных электропечах сопротивления. Техпроцесс состоит из следующих стадий: подготовка шихты, загрузка печи, переплавка шихты, разборка печи, охлаждение блока, сортировка блока. Процесс переплавки шихты длится порядка 8÷10 ч, а процесс охлаждения печи происходит в течение 2-х суток.

Крупные куски абразивных блоков подвергают дальнейшему дроблению и рассеву по размеру. Дробление может осуществляться на щековых, конусных, валковых (с гладкими валками), зубчатых валковых и молотковых (роторных) дробилках. Помимо дробилок могут применяться шаровые мельницы, предназначенные для овализации зёрен, т.е. придания им более изометрической формы путем истирания и скалывания острых вершин и граней зёрен.

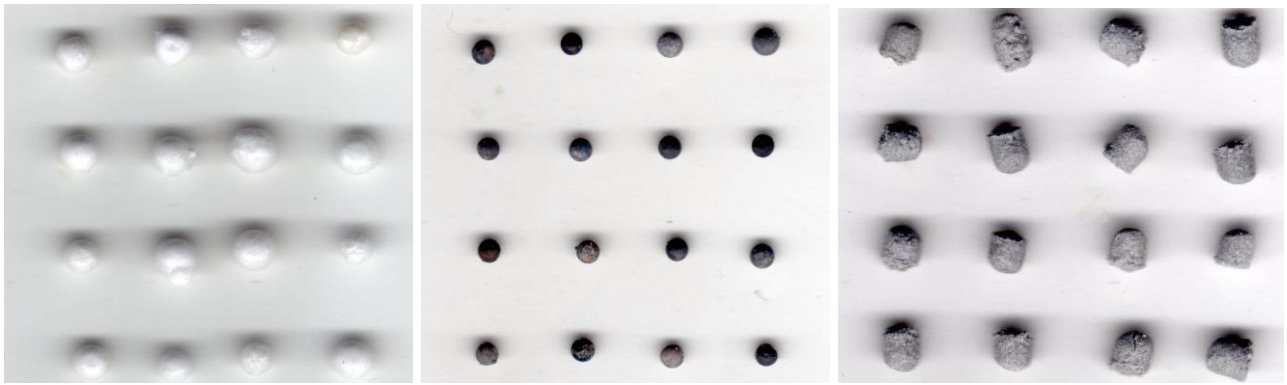
Для разделения измельчённых частиц абразива по крупности применяют операцию грохочения (сортировка на наборе сит) или бесситовую классифика-

цию в воздушном или водном потоках, либо с применением гравитационных или центробежных сил. Более распространён первый вид сепарации абразивных частиц, основанный на использовании грохотов различных конструкций (плоскокачающихся или вибрационных). Измельчённая абразивная масса разделяется по размеру с соблюдением следующих количественных соотношений. Например, при зернистости №63 по ГОСТ 3647–80 [60] основная фракция зёрен (≥41%, ≥45%, или ≥55%, в зависимости от качества рассева: Д – допустимого, Н – нормального, П – повышенного) должна проходить через сито с размерами ячеек 800 мкм и задерживаться на сите с ячейками 630 мкм. При этом 15÷20% зёрен должны задерживаться на сите с ячейками 800 мкм, а остальные – проходить через сито с ячейками 630 мкм. Такой подход к разделению абразивов по размеру обусловлен большими объёмами их производства, конструкцией грохотов (с наклонным расположением сит), и значительным повышением затрат при более тщательном рассеве. Более качественно по размеру разделяют сверхтвёрдые абразивы (алмаз и эльбор), у которых зёрна основной фракции (более 90%) должны иметь размеры из заданного производителем диапазона, указываемого в микрометрах (например, 50/40) [62, 63]. Также сверхтвёрдые абразивы могут разделять по форме, например, на вибросепараторах, с целью обеспечить необходимый коэффициент формы зёрен для инструментов того или иного назначения.

Изготовление сферокорундов (рисунок 1.3, *а, б,*) осуществляется двумя технологическими путями. Полые сферокорунды получают литьем расплава абразива на вращающийся медный диск диаметром 1,5÷2,0 м. Заполненные сферокорунды получают разбрызгиванием выливаемой струи расплава потоком сжатого воздуха или инертного газа (аргона). В обоих случаях происходит разделение расплава на капли, которые под действием сил поверхностного натяжения принимают форму сфер. Кристаллизация капель до твёрдого состояния происходит в полёте. Варьируя параметры распыления расплава (скорость и объём истечения расплава, частоту вращения диска, давление и направление потока сжатого воздуха или газа) получают сферы различных размеров и свойств. Полые сферокорунды применяют в качестве теплоизолирующего ма-

териала, абразивных зёрен для обработки мягких материалов (цветных металлов и сплавов, дерева, резины, кожи, пластмассы) и в качестве пор в шлифовальных кругах. Заполненные сферокорунды под названием пропантов используют для закачки в нефтяные скважины для повышения их отдачи.

Техпроцесс производства формокорундов основан на использовании метода спекания. Исходным сырьём служат высокоглинозёмистые бокситы, глинозём и его мелкодисперсные отходы. В сырьё вводят пластифицирующие добавки (бентонитовые глины), обеспечивающие пластичность получаемой массы. При изготовлении формокорунда исходные материалы измельчают и смешивают в шаровых мельницах мокрого помола. Готовый шликер из шаровой мельницы подаётся в пропеллерную мешалку и далее на пресс для обезвоживания, а затем в вакуум-мялку для проминки. Затем масса подаётся на гидравлический пресс, где с помощью различных фильер производится экструдирование полуфабрикатов формокорундов заданной формы и размеров. Полученные полуфабрикаты высушиваются при температуре 200 °С в проходных сушилках и поступают на резательную машину, где происходит их резка до размеров, требуемых для получения определённой марки формокорунда (рисунок 1.3, *в*). Термообработка зёрен формокорунда осуществляется во вращающемся прокалочном барабане при температуре обжига 1650÷1900 °С.



а) *б)* *в)*

Рисунок 1.3 – Сферокорунды и формокорунды: *а)* – полый сферокорунд, зернистость №160 (F12); *б)* – заполненный сферокорунд (пропант), зернистость №80 (F24); *в)* – формокорунд цилиндрический, зернистость №200 (F10)

1.4 Основные технологии производства шлифовальных кругов

Техпроцесс производства шлифовальных кругов на керамической связке [3, 4, 89, 168, 182] состоит из следующих операций: приготовление формовочной массы, формование кругов, сушка, обжиг, механическая обработка, контроль, маркировка и складирование. Исходные компоненты (зёрна, увлажнитель, связку, наполнители) последовательно дозируют в соответствии с заданной рецептурой и смешивают в мешалках планетарного типа (10÷15 мин) или в шаровых барабанах (1÷4 ч). Смешанную массу пропускают через вибрационное сито для удаления комков, примесей и загрязнений и подают к прессам (гидравлическим или механическим) для формования кругов. Для обеспечения равномерной структуры круга и его максимальной уравновешенности массу в прессформе тщательно разравнивают. Круги прессуют до заданной высоты (по выставленным упорам) или до заданного давления прессования. Далее круги сушат в камерах или туннельных сушилах нагретым воздухом при температуре 100 °С и затем обжигают в туннельных печах при температуре до 1230÷1300 °С в течение 42÷96 ч. Обожжённые крупногабаритные круги и инструменты для высокоскоростного шлифования, ввиду возможных размерных отклонений, получаемых в процессе изготовления, могут подвергаться дополнительной механической токарной обработке резцами и карандашами из алмаза или эльбора. Готовые круги проверяют на точность размеров, уравновешенность, разрывную прочность, твёрдость. После этого маркируют и отправляют на склад.

Техпроцесс производства кругов на бакелитовых связках состоит из следующих операций: дозирование компонентов в соответствии с заданной рецептурой, смешивание компонентов в смесителях, протирка готовой смеси через вибрирующее сито на протирочных машинах, укладка смеси в прессформу, формование кругов на прессах, термическая обработка при максимальной температуре до 200 °С, контроль характеристик, маркировка, складирование. Более подробно этот техпроцесс описан в главе 3.

Производство кругов на вулканитовой связке начинают с изготовления

связки, в состав которой входят: синтетический каучук, сера, окись цинка и магния, каптакс, тиурам. Связку изготавливают на смесительном оборудовании (вальцах или мешалках) путём расплавления каучука и последовательного введения остальных компонентов. В готовую связку в нужной пропорции добавляют зёрна, смешивают абразивную массу и прокатывают её на вальцах. Из полученных пластов абразивной массы вырубают круги требуемых размеров, которые затем термообрабатывают в камерных или туннельных вулканизаторах при температуре 160÷170 °С. Далее круги испытывают, маркируют и отправляют на склад.

Существует также технология изготовления крупногабаритных кругов на вулканитовой связке, при которой формовочную массу укладывают в пресс-форму, формуют круги, после чего подвергают их термообработке.

Технология изготовления шлифовальных инструментов на глифталевой связке в целом подобна технологии их изготовления на бакелитовой связке.

Шлифовальные круги на основе эпоксидной смолы (например шлифовальные шеверы) изготавливают методом литья. Подготовленную формовочную массу из композиции щлифматериалов, эпоксидной смолы с отвердителем и наполнителей заливают или укладывают в форму, после чего происходит её самоотверждение. Затем форму разбирают, инструмент подвергают дополнительной механической обработке, контролю, испытанию и маркировке.

1.5 Пути повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных кругов технологическими способами

Качество и потребительские свойства шлифовальных инструментов зависят от комплекса слагаемых, в число которых входят: качество шлифовальных зёрен и связки, прочность образуемого ими композита «зерно-связка», эффективность используемой конструкции инструмента и качество элементов его конструкции, тщательность соблюдения и совершенствование технологического процесса изготовления инструмента.

Для определения степени влияния на конечный результат перечисленных факторов, в частности, проанализированы результаты исследования физико-механических свойств компонентов инструментов на бакелитовой связке на примере отрезных кругов диаметром 900 и 1200 мм производства Юргинского абразивного завода [194, с. 90]. Эти данные показывают, что меньше всего изменению прочности от партии к партии подвержены шлифовальные зёрна с одинаковой маркой и зернистостью, производимые на одном предприятии. При этом, средняя прочность бакелитовой связки одной и той же марки, определяемая путём изготовления и испытания на растяжение образцов «восьмёрок», может меняться в пределах до 17÷21 %. В связи с тем, что прочность связки напрямую влияет на прочность шлифовальных кругов, есть основания для повышения стабильности свойств бакелитовых связок и создания или нахождения новых марок полимерных связующих с повышенной прочностью. Кроме того, перспективы для повышения прочности композитного материала абразивных инструментов имеются и в области создания новых рецептур с различными упрочняющими добавками. Это видно, например, из сравнения рецептур отечественных (в составе 5 компонент) и импортных (в составе 9 компонентов) формовочных смесей на бакелитовых связках (п. 1.2.2, с. 37).

Качество приготовления абразивных смесей (т.е. тщательности перемешивания и равномерности распределения зёрен, связки и наполнителей по объёму инструмента) также непосредственно влияет на прочность кругов и этот показатель следует улучшать. Так, вдоль линий разлома шлифовальных кругов, разрушенных при прочностных испытаниях, показатель условной пористости практически всегда выше, чем в других местах у этих же инструментов.

На прочность шлифовальных кругов существенное влияние также оказывает наличие упрочняющих элементов и стабильность их свойств. Так, прочность сеток марки СПАП, используемых в качестве армирующих элементов в шлифовальных кругах на бакелитовой связке, в разных партиях может различаться до 30÷40 %. Эта нестабильность говорит о необходимости дальнейшего улучшения свойств сеток, а также совершенствования их конструкции, напри-

мер, за счёт замены квадратной формы ячеек на радиально-кольцевую или иную, с тем, чтобы расположение нитей в сетках было приближено к направлению действия тангенциальных растягивающих напряжений в круге при работе.

Кроме качества компонентов на качество шлифовальных кругов могут влиять также особенности технологии их изготовления. Для изучения этого вопроса проведено сравнение технологических процессов производства отрезных кругов на бакелитовой связке на ОАО «Юргинские абразивы» (Россия) и «Rottluff» GmbH (Германия), во время осуществления там деловых визитов и прохождения научных стажировок [149] (прил. 4, с. 350). Сравнение качества кругов этих заводов показывает, что инструменты фирмы «Rottluff» по производительности и стойкости несколько превосходят отечественные инструменты.

Поэтапный анализ технологического процесса упомянутой зарубежной фирмы (рисунок 1.4, *а*, *б*, *в*, *г*, *д*, *е*) показывает, что итоговое преимущество её готовых изделий складывается из ряда факторов, в число которых входят:

1. Тщательность приготовления абразивной смеси. Операция смешивания производится на смесителе МДМ 110 UN производства итальянской фирмой «Davide Maternini» (рисунок 1.4, *а*), снабженном системой цифровой индикацией. Смеситель имеет два чана и процесс смешивания осуществляется в следующей последовательности: смешивание шлифовальных зёрен в верхнем чане с жидким бакелитом (5÷7 мин); перекладка полученной смеси во второй чан и добавление в неё пульвербакелита и наполнителей; окончательное смешивание (5÷12 мин); просеивание полученной смеси на вибросите. Преимущество зарубежной технологии на данном этапе состоит в использовании двух разных чанов для смешивания разнородных компонентов.

2. Производительность и точность прессования. Готовая формовочная абразивная смесь поступает в прессовый цех, где на многопозиционных прессах с ЧПУ (итальянского и немецкого производства фирм «Paul Rypl», «John Schehr Mauselwitz», «Avery Berkel», «Davide Maternini»), осуществляется формование. На рисунке 1.4, *б* показан один из гидравлических прессов модели HP 59/53, на котором в автоматическом режиме выполняются следующие действия:



а)



б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 1.4 – Оборудование для производства отрезных шлифовальных кругов фирмы «Rottluff»: *а)* – смеситель МДМ 110 UN; *б)* – пресс HP 59/53; *в)* – печь для термообработки отрезных кругов GDT 156/V; *г)* – гидравлический вытягивающий станок HLP46; *д)* – гидропневматический отбивающий станок модели Simatik OP17; *е)* – автомат для упаковки отрезных кругов

в форму укладывается нижняя этикетка и нижняя армирующая сетка; засыпается формовочная смесь, разравнивается и удаляются ее излишки; укладываются верхняя армирующая сетка, верхняя этикетка, калибровочная втулка; осуществляется прессование. Преимущество данной операции на фирме «Rottluff» состоит в её полной (на ряде прессов) или частичной автоматизации, в многопозиционных конструкциях прессформ и, как следствие, в высокой производительности и точности.

3. Точность выполнения графика термообработки кругов. Бакелизация осуществляется в газовых печах фирмы «Ernst Reinhard» марки GDT 156/V (рисунок 1.4, *в*), отличительной особенностью которых является наличие блоков управления с ЧПУ. Благодаря этому график бакелизации шлифовальных кругов, длящийся 24 часа и состоящий из 11-ти контролируемых стадий нагрева и нескольких стадий охлаждения, выдерживается в автоматическом режиме с точностью до 1÷2 °С, а также дополнительно контролируется оператором.

4. Автоматизация процесса снятия пакетов спечённых кругов со штанг. Операция осуществляется на гидравлических вытягивающих станках фирмы «AGL Maschinen und Anlagen Service», марки HLP46 (рисунок 1.4, *г*). Станки в автоматическом режиме вытягивают штанги из пакетов кругов за 1÷2 мин.

5. Автоматизация отделения кругов от прилипших к ним металлических разделительных пластин. Операция производится на гидропневматических отбивочных станках фирмы «Siemens – O.R.S.A» модели Simatik OP17 (рисунок 1.4, *д*). Станки оборудованы ЧПУ и автоматически, без вмешательства оператора, быстро и бездефектно отделяют металлические пластины от кругов. На отечественном предприятии эта операции осуществляются вручную, с невысокой производительностью и, иногда, с повреждением шлифовальных кругов при нанесении резких ударов для отделения пластин.

6. Автоматизация упаковки готовых кругов. Автомат упаковки в термоусадочную плёнку имеет пятипозиционный рабочий стол, устройство для нагрева и нагнетания горячего воздуха в рабочую зону, систему цифровой индикации (рисунок 1.4, *е*). Он позволяет упаковывать круги быстро и качественно.

1.6 Выводы по главе 1

Основываясь на проведенном анализе свойств шлифовальных зёрен и технологий их изготовления, свойств изготавливаемых из них инструментов, свойств компонентов, применяемых при изготовлении твердотельных шлифовальных инструментов, технологий изготовления инструментов и основных направлений исследований по повышению эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов установлено что:

1. Существенно повысить эффективность шлифования возможно путем создания и применения абразивных инструментов с упорядоченной геометрией абразивных зёрен посредством управления формой зёрен и их ориентацией в теле инструментов;

2. Форму зёрен возможно упорядочить путём целенаправленной сепарации исходной массы абразива, получаемой в результате дробления абразивных слитков, на ряд фракций, форма в которых дискретно изменяется от изометрической до игольчато-пластинчатых разновидностей, а также изготавливая зёрна заданной формы с применением технологий производства сферокорундов и формокорундов;

2. Ориентирование абразивных зёрен производится при производстве весьма ограниченной номенклатуры шлифовальных инструментов с применением электростатического, электромагнитного, гравитационного и иных принципов воздействия. Особую актуальность представляют решение вопросов по эффективному ориентированию зёрен при производстве твердотельных шлифовальных инструментов, например, – шлифовальных кругов;

3. При проектировании и изготовлении шлифовальных инструментов с упорядоченной геометрией абразивных зёрен целесообразно иметь точные количественные методы, оборудование и программное обеспечение для оценки геометрических и иных показателей зёрен: коэффициента формы, площади их поверхности, величин передних углов, напряжений и прочности, количества в единице объёма и оценки особенностей износа зёрен;

4. Для возможности эффективного прогнозирования и управления свойствами шлифовальных инструментов с упорядоченной геометрией зёрен при их проектировании целесообразно произвести исследования, установить и математически описать взаимосвязи формы и ориентации зёрен в шлифовальных инструментах (в шлифовальных кругах при шлифовании сталей) с показателями их режущей способности, коэффициентом шлифования, мощностью и температурой резания, структурой металла заготовок и шероховатостью поверхностей после шлифования;

5. В качестве методической основы при проведении исследований необходимо учитывать разработки в области теории шлифования материалов [25, 47, 70, 79, 80, 83, 86, 185, 186, 187, 197, 201, 202, 222, 234, 236, 255, 262, 267, 278, 280, 281, 284, 291, 293, 310], методологии и практику проектирования, изготовления и испытания шлифовальных инструментов различных исследователей [2, 3, 4, 5, 72, 83, 89, 97, 165, 167, 168, 169, 170, 176, 180, 182, 204, 206, 222, 227, 252, 253, 258, 262, 263, 266, 273, 279, 313], теорию прочности хрупких тел [29, 37, 49, 74, 84, 97, 101, 179, 182, 188, 189, 190, 257, 258, 259, 269, 284], теорию прочности вращающихся объектов [55, 97, 174, 175, 182, 194, 226, 257, 258, 273, 310], теорию вибрационного сепарирования частиц [19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 34, 38, 81, 97, 270].

6. Актуальным при проведении исследований является применение методов математического моделирования, статистической обработки и корреляционно-регрессионного анализа, метода конечных элементов с применением возможностей ЭВМ и различного программного обеспечения, в т.ч. программ «Excel, «Statistica»; «Компас» «Paint», «SolidWorks» и др.;

7. При решении исследовательских задач, наряду с известным программным продуктом целесообразно создавать и применять специализированное программное обеспечение.

Глава 2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ СОЗДАНИЯ И РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН

2.1 Алгоритм создания и рационального применения абразивного инструмента с заданной формой и ориентацией зёрен

Факторы формы и ориентации зёрен оказывают непосредственное влияние на работоспособность шлифовальных инструментов. Подбор рациональной формы или направления ориентации зёрен для конкретных типов шлифовальных инструментов под конкретные режимы резания и обрабатываемый материал обычно производится опытным путём, что весьма трудоёмко. Вместе с тем, появляются новые технологии, позволяющие целенаправленно регулировать форму и ориентацию зёрен. Так, в представленной работе предложены разработанные и запатентованные способы изготовления шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен [209, 210].

Совместный подбор рациональной формы и ориентации зёрен экспериментальным путём представляется ещё более сложной практической задачей. Например, для сравнения шлифовальных инструментов с четырьмя различными типами формы зёрен и четырьмя направлениями их ориентации потребуется изготовить шестнадцать разновидностей инструментов, минимум по три инструмента каждой разновидности и испытать их. При этом, использование матрицы испытаний 4×4 может оказаться недостаточным для нахождения рационального сочетания коэффициента формы и угла ориентации зёрен.

В связи с этим, для создания шлифовальных инструментов с рациональной геометрией зёрен целесообразно иметь чётко отработанный порядок действий и исследовательские методики, позволяющие предвидеть и управлять эксплуатационными показателями инструментов на этапе их проектирования.

При выполнении этой задачи в рамках диссертационной работы экспериментально установлено, как форма и ориентация зёрен влияют на величины их передних углов и максимальных напряжений в зёрнах при работе. Установлены

характер и степень влияния величин передних углов зёрен на режущую способность шлифовальных инструментов, деформации обрабатываемого материала, шероховатость обрабатываемых поверхностей, эффективную мощность и температуру резания, а также влияние уровня максимальных напряжений в зёрнах на стойкость инструментов.

Полученные результаты позволили сформулировать **алгоритм** создания и рационального применения абразивного инструмента с контролируемой формой и ориентацией зёрен, состоящий в том, что:

– для прогнозирования эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов на этапе проектирования целесообразно изучить геометрию зерен, 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.

Научное обоснование предложенного алгоритма отражено в представленных далее методологических разработках.

2.2 Способы оценки формы шлифовальных зёрен

При анализе геометрии шлифовальных зёрен необходимо оценивать их форму. Как упоминалось ранее, более объективна и точна количественная оценка формы зёрен (п. 1.2.1) и её целесообразно использовать для выявления количественной взаимосвязи между различными параметрами.

Существует ряд методик количественной оценки формы зёрен, основанных на сравнении проекций реального зерна на плоскости с прямоугольником [62], эллипсом [3] и окружностью [101]. В данной работе за основу для оценки формы зёрен взят метод, базирующийся на определении их коэффициентов формы, равных отношению диаметров описанных и вписанных в проекции зёрен окружностей (формула 1.1). Для этого используется планшетный сканер, на который кладется не менее 50÷100 исследуемых зёрен, и с помощью специального программного обеспечения [244, 246] ведутся построения вписанных и описанных окружностей в изображениях проекций зерен, по которым определяются текущий и средний коэффициенты формы.

Так как шлифовальные зёрна довольно часто имеют весьма сложную пространственную конфигурацию, то достаточно точно оценить их форму только по одной проекции на плоскости не всегда возможно (например, для зёрен пластинчато-игольчатых разновидностей). Вследствие этого описанный метод в данной работе был усовершенствован путём применения в качестве объектов сравнения сфер, вписываемых и описываемых внутри и снаружи тела зерна [137, 138, 247]. Для реализации нового метода оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве (в объёме) каждое исследуемое зерно закреплялось на поворотном устройстве, установленном на рабочем столе стереомикроскопа, и фотографировалось цифровым фотоаппаратом в двух видах – в плане и сбоку (рисунок 2.1, рисунок 2.2).

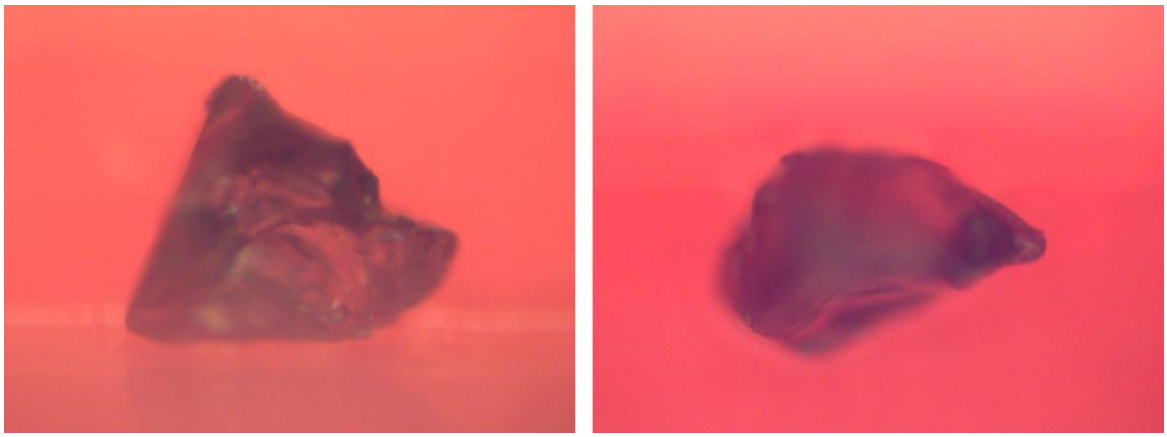
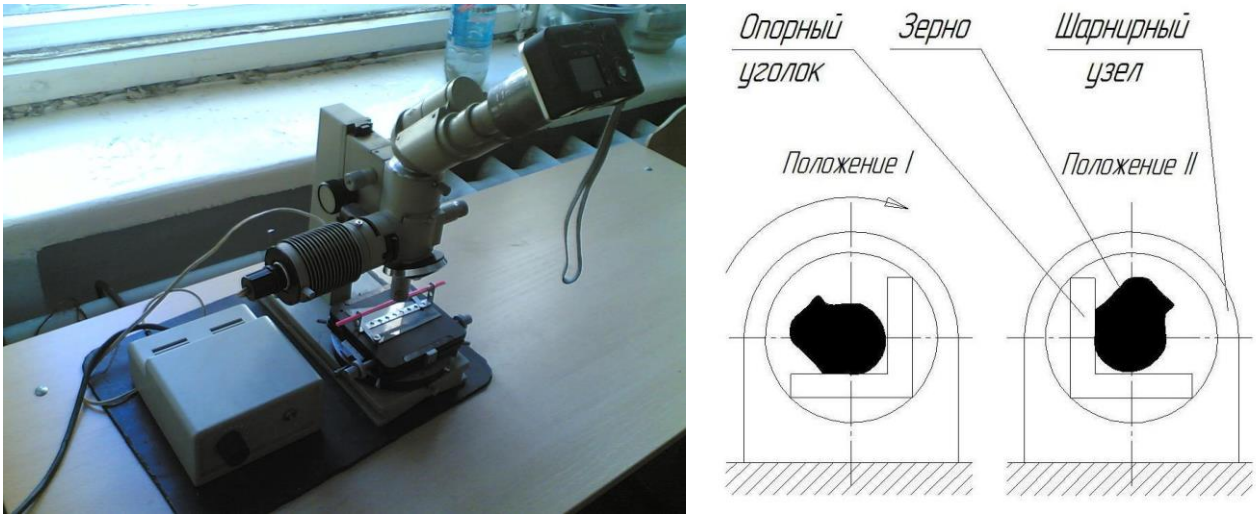


Рисунок 2.1 – Две взаимно перпендикулярные проекции шлифовального зерна марки 53С 32Н (F54), полученные при 200-кратном увеличении

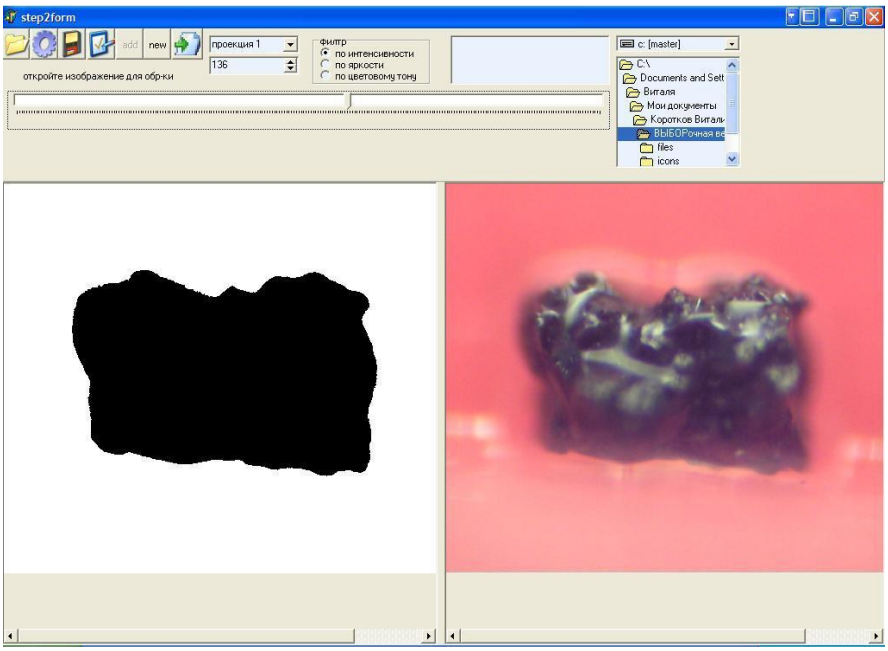


а) *б)*

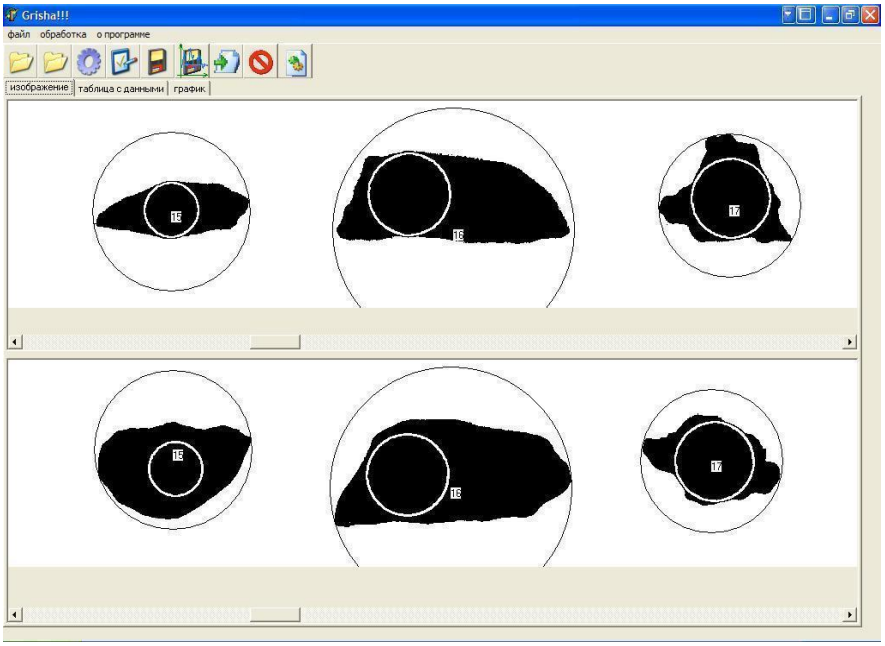
Рисунок 2.2 – Микроскоп ЛОМО МЕТАМ Р-1 с установленным цифровым фотоаппаратом и поворотным устройством для получения изображений шлифовальных зёрен в двух проекциях (*а*) и схема работы этого устройства (*б*)

Поворотное устройство представляет собой шарнирно закреплённый уголок из пластмассы красного цвета. Указанный цвет лучше других контрастирует с изображениями зёрен, благодаря чему их контуры фиксируются наиболее чётко. Шлифовальные зёрна закреплялись на поворотном устройстве при помощи водного раствора сахара. Данный клеевой состав после высыхания сохраняет прозрачность, не даёт бликов на фотографиях, не искажает изображения зёрен, обеспечивает их надёжное закрепление и, при необходимости, лёгкое удаление с поворотного устройства.

Полученные изображения зёрен обрабатывались на ЭВМ с помощью специально разработанной программы «Форма шлифовальных зёрен в объёме» [247] (прил. 5, с. 351), которая структурно состоит из двух блоков (рисунок 2.3). Первый блок предназначен для преобразования цветных изображений зёрен в черно-белые и соединения их одноимённых проекций в два изображения – виды в плане и виды сбоку. Во втором блоке программы два вида одних и тех же зёрен совместно анализировались в соответствии с математическим алгоритмом, позволяющим определять в теле каждого зерна диаметры минимально возможных описанных и максимально возможных вписанных сфер.



а)



б)

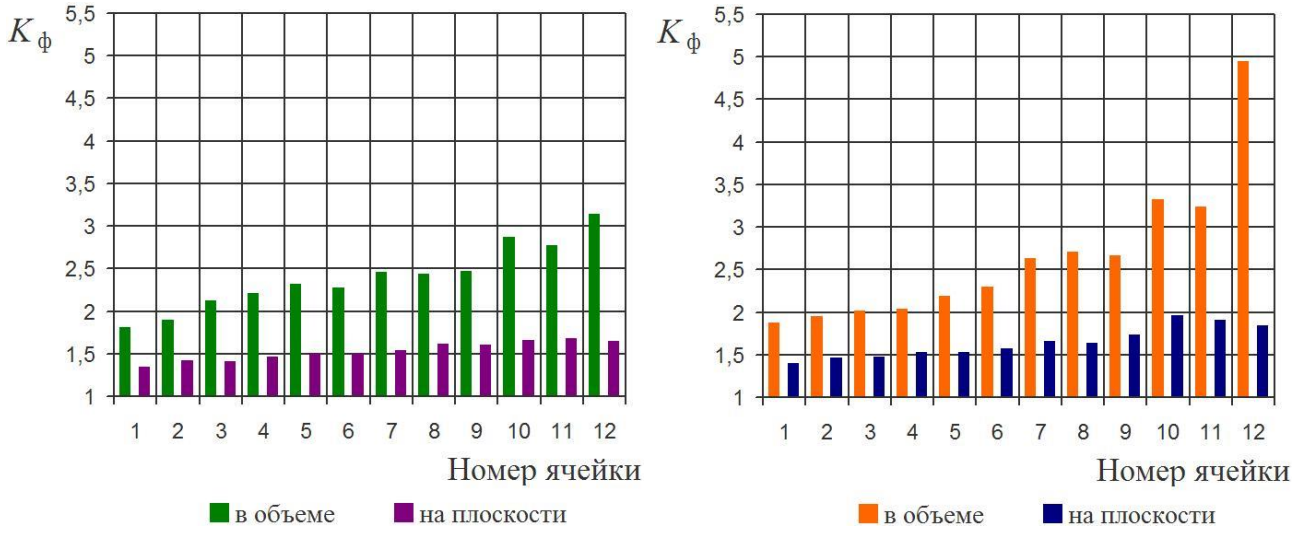
Рисунок 2.3 – Программа для ЭВМ «Форма шлифовальных зёрен в объёме»: *а)* блок 1 – преобразование цветных изображений шлифовальных зёрен в чёрно-белые; *б)* блок 2 – построение по двум проекциям зёрен минимально возможных описанных и максимально возможных вписанных сфер

Здесь для каждой координаты X на проекции зерна находится максимально возможная вписанная окружность, у которой центр расположен в точке с рассматриваемым значением координаты X. Диаметры максимально возмож-

ных вписанных окружностей для одинаковых координат X на двух проекциях зерна сравниваются и из двух диаметров выбирается меньший. После этого идёт сравнение выбранных (меньших) диаметров по всем координатам X и из них выбирается наибольший. Он и является диаметром максимально возможной вписанной сферы. Диаметр описанной сферы определяется из сравнения диаметров описанных вокруг двух проекций зерна окружностей и выбора наибольшего диаметра. Итоговый результат визуально отображается на проекциях зёрен (рисунок 2.3, *б*). На основе полученных данных в программе рассчитывается текущий коэффициент формы исследуемых зёрен, а для фракции абразива определяется средний коэффициент формы путём обобщения результатов оценки формы не менее 50÷100 отдельных зёрен. Полученные данные, согласно алгоритму программы, сохраняются в формате таблиц Excel, а также в виде графиков.

Для выяснения, какой из описанных методов оценки формы зёрен (на плоскости или в объёме) является наиболее приемлемым с позиций достоверности и оперативности получаемых результатов, были проведены специальные сравнительные исследования. Они проводились на шлифовальных зёрнах нормального электрокорунда 13А 63Н (F30) и зёрнах карбида кремния черного 53С 32Н (F54). Исследовались фракции зёрен, предварительно разделенных по признаку формы на вибрационном сепараторе [207]. Для каждой марки абразива было исследовано 12 фракций зёрен, по числу задействованных ячеек сепаратора. Результаты исследований представлены на рисунке 2.4, *а, б*.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что при оценке формы зёрен на плоскости и в объёме диаграммы распределения коэффициентов формы имеют, в целом, сходный вид. При этом метод оценки формы зёрен на плоскости даёт некоторую погрешность, которая тем выше, чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют исследуемые зёрна. Вместе с тем, этот метод проще и производительнее и, поэтому, он предпочтительнее в случаях, когда необходимо в сжатые сроки оценить форму большого числа фракций зёрен различных марок и зернистостей.



а) *б)*

Рисунок 2.4 – Оценка формы шлифовальных зёрен 13А 63Н (F30) (*а*) и 53С 32Н (F54) (*б*) двумя методами – в объёме и на плоскости

Метод оценки формы зёрен в объёме более достоверен и его целесообразно применять в случаях, когда требуется высокая точность измерений и когда в абразиве содержится значительная доля зёрен пластинчатых разновидностей (например, у зёрен карбидов кремния). Однако этот метод более трудоёмок и менее оперативен. В связи с тем, что в данной работе при исследовании влияния формы зёрен на эксплуатационные показатели шлифовальных кругов приоритетным являлось получение точных данных, форма зёрен преимущественно оценивалась объёмным методом.

2.3 Разделение шлифовальных зёрен по форме

При необходимости выделения из общей массы абразива фракций зёрен с определенной формой можно использовать различные методы и подходы. Они сформировались в разных сферах деятельности, на основе практики разделения по форме и размерам сыпучих масс каких-либо мелких частиц (например, семян растений, фракций горных пород и др.) [19, 20, 27, 81, 97, 270].

Все методы по принципу разделения можно дифференцировать на следующие группы: разделение частиц по форме с помощью сил трения; разделе-

ние с использованием свойств парусности частиц; разделение с помощью электростатического поля; комбинированные методы. Для реализации этих методов на практике используют различные конструкции сепараторов, в том числе: неподвижные скатные горки [21], винтовые [38], центробежные [81], вибрационные [8, 19, 22, 23, 97, 207], гидро- и аэродинамические [34], электростатические [17], комбинированные электростатические [183, 213] сепараторы.

Анализ перечисленных методов и устройств для разделения частиц по форме с позиций возможности их применения для сортировки шлифовальных зерен показывает, что лишь часть из них может быть эффективно использована для такой цели. Это обусловлено тем, что одни из них сложны в реализации и в обслуживании, другие не обеспечивают требуемой производительности сортировки, третьи не гарантируют необходимого качества и широты диапазона разделения исходной массы абразива.

Среди известных конструкций устройств для разделения шлифовальных зёрен по форме наиболее приемлемыми представляются вибрационные сепараторы. Они, как правило, сочетают в себе ряд положительных моментов, в числе которых: простота конструкции и легкость в эксплуатации, достаточно высокая производительность и качество сепарирования. Данные сепараторы, независимо от разновидностей конструктивного исполнения, имеют в своем составе ряд общих элементов – наклонную деку, вибровозбудитель, упругую систему и раму. Деке, при помощи вибровозбудителя, сообщаются колебательные движения с необходимой частотой и амплитудой, в результате которых частицы, находящиеся на деке, начинают перемещаться по определенным траекториям, разделяясь на группы с одинаковыми характеристиками.

Вибрационные сепараторы различаются по: целевому назначению – для разделения частиц по размерам и по форме; числу выдаваемых продуктов сепарации – на двух-, трёх- и многопродуктовые; числу дек – на одно- и многодечные (многоярусные); типу дек – на сепараторы с плоскими, вогнутыми и коническими деками; конструкции дек – на одинарные или многожелобчатые, секционные, односкатные или двускатные деки; типу колебаний – на сепараторы с

прямолинейными гармоническими колебаниями дек, с бигармоническими или эллиптическими, с круговыми или винтовыми колебаниями дек; типу вибровозбудителя – с механическим дебалансом или электромагнитным возбудителем; характеру рабочей поверхности – на деки с гладкими или шероховатыми поверхностями; способу установки – на опорные (деки опираются на рессоры, установленные на раме) или опорно-подвесные (деки совершают колебания вместе с подвижной рамой, подвешенной на тросах к опорной раме).

В данной работе для разделения шлифовальных зёрен по форме был использован вибрационный сепаратор [207], внешний вид которого изображён на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Внешний вид вибрационного сепаратора для разделения шлифовальных зёрен по форме

Технические характеристики вибрационного сепаратора: габаритные размеры – 1020×850×1300 мм; размер деки – 500×800 мм; размер разделяемых зёрен – 250÷1250 мкм; производительность –1,0÷4,0 кг/ч; частота колебаний деки – 1600÷1900 мин$^{-1}$; амплитуда колебаний – 0,6÷3,0 мм; угол продольного наклона деки – 0÷30°; угол поперечного наклона деки – 0÷10°; мощность электродвигателя – 0,12 кВт.

Вибросепаратор состоит из плоской деки, закрепленной на активной ра-

ме, которая посредством рессорно-упругой системы зафиксирована на реактивной раме. Реактивная рама соединена виброизоляторами с поворотной рамой, расположенной на станине сепаратора. Поворотная рама позволяет регулировать углы продольного и поперечного наклона деки.

Вибрации деки задаются электродвигателем с дебалансным вибровозбудителем, а изменение частоты вибраций обеспечивается за счет бесступенчатого регулирования скорости вращения электродвигателя. Амплитуда колебаний деки варьируется путём изменения массы сборных дебалансов и фазового угла между ними.

Частота и амплитуда колебаний деки, а также углы её наклона в продольном и поперечном направлениях подбираются экспериментальным путем для каждой марки и зернистости сортируемого абразива с целью обеспечения наиболее качественного и производительного процесса сепарации.

При работе вибросепаратора исходный абразивный материал подаётся с помощью питателя в верхнюю часть нижнего короткого торца деки и под действием вибраций и сил трения начинает веерообразно расходиться по её поверхности. При этом зёрна изометрической формы перемещаются вниз по коротким траекториям в ближние приёмники, а чем ближе форма зёрен к пластинчато-игольчатым разновидностям, тем по более пологим и длинным траекториям они двигаются и попадают в дальние приёмники. Общее количество задействованных приёмников зёрен (ячеек) составляет, как правило, от 12 до 14.

Механика перемещения частиц по наклонной вибрирующей плоскости основана на комбинированном действии сил тяжести, трения и вибрационного воздействия. Для перемещения частицы по вибродеке необходимо, чтобы продольная составляющая её силы инерции превысила сумму силы трения между частицей и поверхностью деки и силы, влекущей в направлении уклона деки:

$$m \cdot a > N \cdot f + m \cdot g \cdot \sin\alpha \,, \qquad (2.1)$$

где m – масса частицы; a – ускорение, сообщаемое декой; N – сила нормального давления; f – коэффициент трения; g – ускорение свободного падания; α – угол продольного наклона деки.

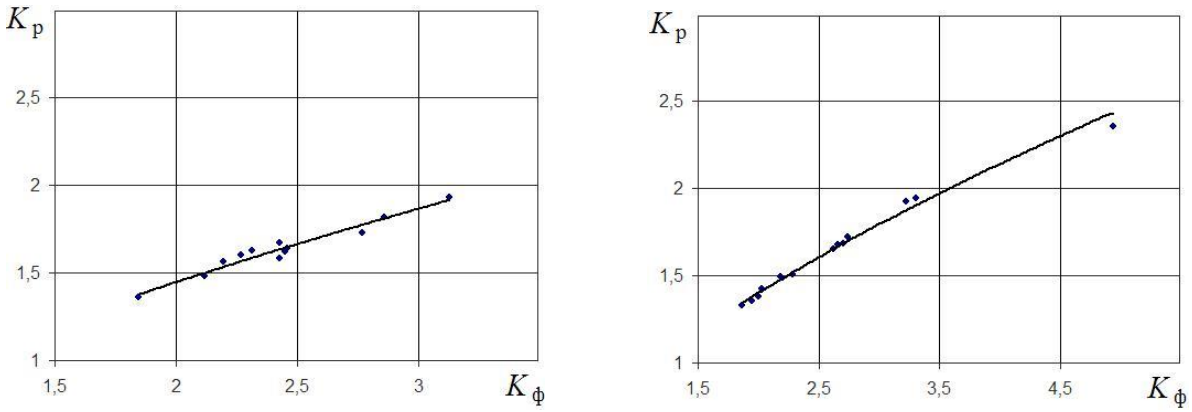
2.4 Взаимосвязь формы зёрен с площадью их поверхности и количеством в единице объёма

Площадь поверхности, наряду с формой, также является важным параметром, характеризующим геометрические свойства шлифовальных зёрен. Есть основания полагать, что зёрна разной формы имеют разные величины площадей своих поверхностей. Следствием такого различия может явиться разная прочность адгезии зёрен со связкой, которая, как известно, оказывает существенное влияние на эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов.

Оценка различий в величинах площади поверхности у зёрен с разной формой первоначально производилась косвенным путём. Анализировались изображений зёрен на плоскости и определялся коэффициент развитости их поверхности ($K_р$), равный отношению длины контура зерна ($L_к$) к периметру максимально возможной вписанной в проекцию зерна окружности ($L_{во}$):

$$K_р = L_к / L_{во} \qquad (2.2)$$

При проведении исследований использовались изображения зёрен, полученные на микроскопе в двух взаимно перпендикулярных проекциях (п. 2.2). Коэффициенты формы зёрен определялись в трёхмерном пространстве при помощи программы для ЭФМ «Форма шлифовальных зёрен в объёме» как отношение диаметров описанных и вписанных в зерно сфер [247]. Коэффициент развитости поверхности зёрен устанавливался посредством программы для ЭВМ «Форма шлифовальных зёрен» [246], которая помимо оценки диаметров описанных и вписанных окружностей на плоских изображениях зёрен позволяет определять длины контуров зёрен. В процессе исследований установлены средние величины коэффициентов развитости поверхности у 12 фракций электрокорунда нормального 13А 63Н (F30) и 12 фракций карбида кремния чёрного 53С 32Н (F54) с различной формой, полученных на вибросепараторе (п. 2.3). В каждой фракции исследовалось 50 зёрен (по 2 изображения на зерно). В результате установлены зависимости средних коэффициентов развитости поверхности зёрен во фракциях от средних коэффициентов их формы (рисунок 2.6, *а*, *б*.).



а) *б)*

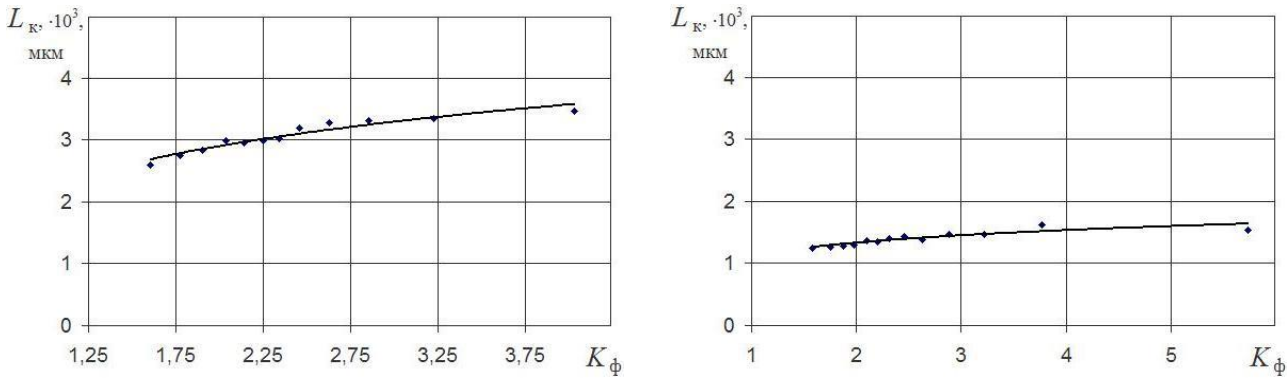
Рисунок 2.6 – Зависимости коэффициентов развитости поверхности зёрен ($K_р$) от коэффициента формы ($K_ф$) для фракций абразивов 13А 63Н (F30) (*а*) и 53С 32Н (F54) (*б*) с упорядоченной формой, полученных на вибросепараторе

Выявленные зависимости (рисунок 2.6, *а*, *б*) выражаются степенными моделями следующего вида:

13А 63Н (F30): $K_р = 0{,}937 \cdot K_ф^{\,0{,}626}$; $R^2 = 0{,}95$ (2.3)

53С 32Н (F54): $K_р = 0{,}916 \cdot K_ф^{\,0{,}612}$; $R^2 = 0{,}99$ (2.4)

Полученные результаты (рисунок 2.6) показывают, что с увеличением $K_ф$ поверхность зёрен становится более развитой, длины их контуров ($L_к$) возрастают. Результаты оценки $K_ф$ и $L_к$ всех исследованных зёрен, сведённые для каждой марки абразива в единую таблицу данных и выраженные соответствующими зависимостями, наглядно демонстрируют это на рисунке 2.7, *а, б*.



а) *б)*

Рисунок 2.7 – Зависимости длин контуров зёрен ($L_к$) от коэффициента формы ($K_ф$) у абразивных зёрен марок 13А 63Н (F30) (*а*) и 53С 32Н (F54) (*б*)

Зависимости, представленные на рисунке 2.7 получены путём выстраивания данных по всем исследуемым зёрнам по возрастанию их коэффициентов формы и расчёта средних $K_ф$ и $L_к$ для диапазонов по 50 зёрен. Данные по всем диапазонам заносились на точечные диаграммы, на основе которых строились графики зависимостей. Полученные зависимости (рисунок 2.7, *а, б*) выражаются логарифмическими моделями следующего вида:

13А 63Н (F30): $L_к = 2{,}235 + 0{,}966 \cdot Ln(K_ф)$; $R^2=0{,}92$ (2.5)

53С 32Н (F54): $L_к = 1{,}132 + 0{,}290 \cdot Ln(K_ф)$; $R^2=0{,}81$ (2.6)

Из зависимостей следует, что рост коэффициентов формы у зёрен нормального электрокорунда 13А 63Н (F30) от $K_ф$=1,81 до $K_ф$=3,13 сопровождается увеличением средних длин контуров с 2,81 до 3,34 мм, т.е. на 19 %. У зёрен карбида кремния чёрного 53С 32Н (F54) увеличение коэффициентов формы с $K_ф$=1,87 до $K_ф$= 4,94 приводит к росту длин контуров с 1,31 до 1,6 мм (на 22 %).

Установлено также, что с увеличением $K_ф$ наблюдается некоторое уменьшение диаметров вписанных в плоские проекции зёрен окружностей при одновременном более значительном росте описанных.

Таким образом, полученные результаты наглядно свидетельствует, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зёрна, тем более развитой поверхностью они обладают. Вместе с тем, представляется целесообразным произвести количественную оценку непосредственно площади поверхности исследуемых зёрен с контролируемой формой.

Определить площадь поверхности шлифовального зерна можно путём анализа его пространственно-объемной модели. С целью решения этой задачи был разработан метод и создано программное обеспечение для определения площади поверхности шлифовальных зёрен [137, 245]. Метод основан на том, что исследуемое зерно, как и при определении объёмного коэффициента формы (п. 2.2), фотографируется цифровым аппаратом через стереомикроскоп в двух проекциях – виде в плане и виде сбоку. Готовые цветные изображения зёрен преобразуется в чёрно-белые и обрабатываются с помощью специально разработанной программы «Площадь поверхности и формы шлифовальных зёрен»

[245] (прил. 5, с. 352). Два изображения каждого зерна совместно анализируются и помимо объёмного коэффициента формы определяются площади поверхности зёрен. Площадь поверхности рассчитывается исходя из допущения, что каждое сечение абразивного зерна близко по форме к эллипсу. При поточечном анализе (по оси абсцисс) двух изображений одного зерна определяются величины диагоналей эллипсов для всего множества сечений рассматриваемого зерна. Это позволяет рассчитать искомую площадь поверхности зерна, используя формулы периметра и площади эллипса, а также площади поверхности конусного эллиптического кольца [32, 44]. Площадь поверхности зерна (S) определяется как сумма площадей конусных эллиптических колец между сечениями зерна через каждый пиксель по оси абсцисс. Программа определяет текущие величины площадей и объёмных коэффициентов формы зёрен, а также средние значения для исследуемой фракции. Результаты сохраняются в виде таблиц Excel. Для достоверности получаемых результатов исследуются не менее 50-ти отдельных зёрен из фракции.

С помощью данной программы были установлены значения площадей поверхности и объёмных коэффициентов формы зёрен нормального электрокорунда 13А 63Н (F30) и карбида кремния черного 53С 32Н (F54), разделённых с помощью вибросепаратора на 12 фракций, а также в исходных фракциях абразива, не упорядоченных по форме.

При изучении взаимосвязи «форма зёрен – площадь поверхности» был выявлен дополнительный, активно влияющий фактор – размер зёрен, который даже в рамках одной зернистости значительно варьируется [60, 63]. Поэтому была проведена работа по установлению более точной взаимосвязи между формой и площадью поверхности зёрен с учетом размерного фактора. При этом для оценки размера зёрен выбран диаметр максимальной вписанной окружности при анализе двух плоских изображений рассматриваемого зерна, как показатель, характеризующий возможность прохождения зерна через сито с ячейками того или иного размера. В процессе разработки программы для ЭВМ «Площадь поверхности и формы шлифовальных зёрен» [245] в ней была реализована возможность оценки и сохранения и этого показателя.

При исследовании взаимосвязи площади поверхности зёрен с коэффициентом формы и размером зёрен у фракций абразивов 13А 63Н (F30) и 53С 32Н (F54) (по 650 зёрнам у каждой марки абразива) были построены точечные диаграммы, произведен математический анализ данных, результаты которого отражены в трёхмерном графическом виде на рисунке 2.8 и в соответствующих математических моделях.

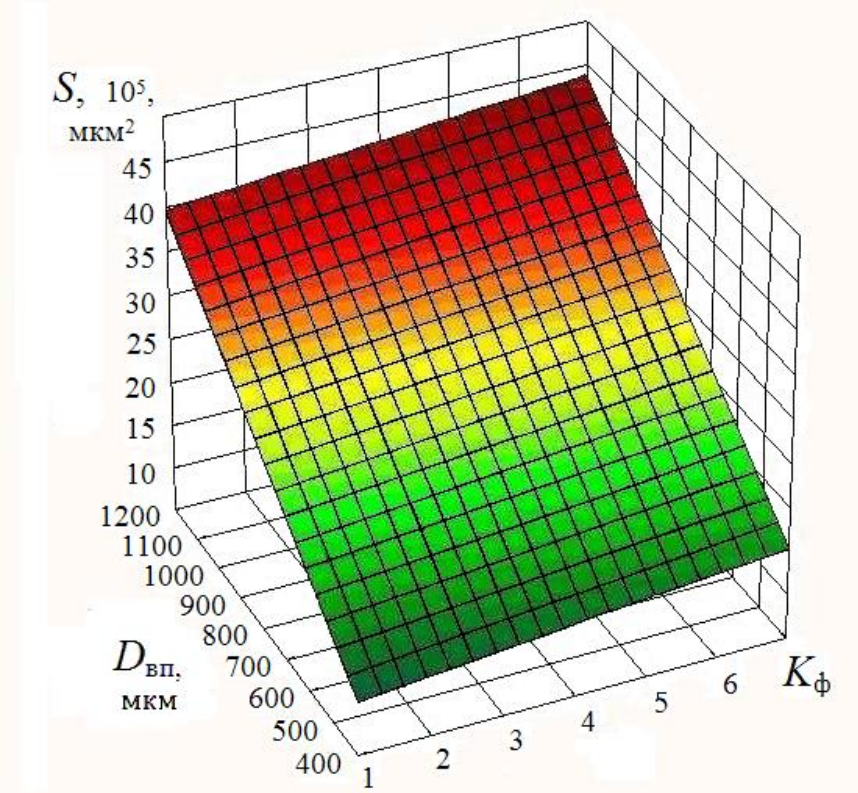


Рисунок 2.8 – Зависимость площади поверхности (S) шлифовальных зёрен 13А 63Н (F30) от их объёмного коэффициента формы ($K_ф$) и размера ($D_{вп}$)

Выявленные зависимости наиболее достоверно математически описываются линейными моделями следующего вида:

13А 63Н (F30): $S = -387800 + 70879{,}7 \cdot K_ф + 3572{,}05 \cdot D_{вп}$; $R^2 = 0{,}69$ (2.7)

53С 32Н (F54): $S = -49280 + 352{,}483 \cdot K_ф + 1675{,}38 \cdot D_{вп}$; $R^2 = 0{,}73$ (2.8)

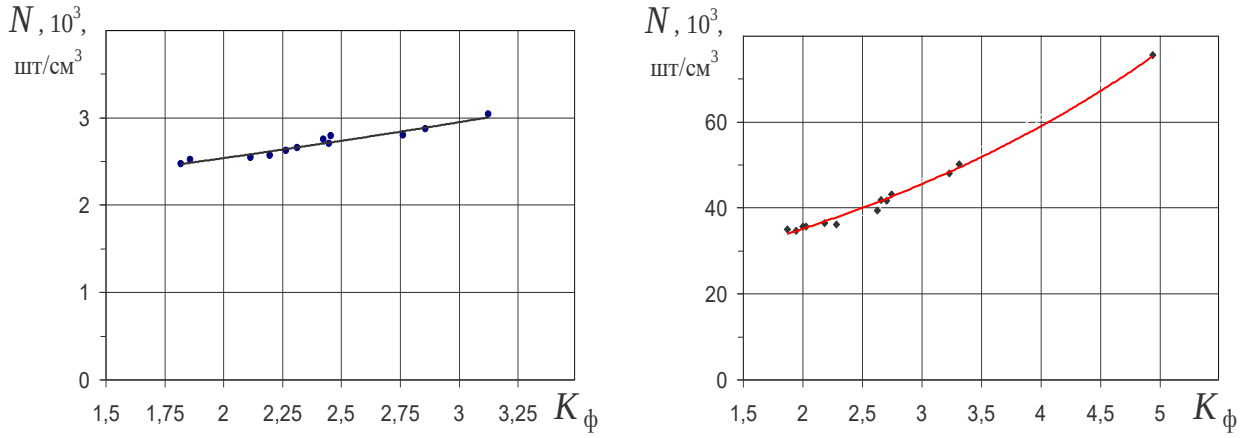
Вид этих зависимостей (здесь и далее) выбирался путём последовательного описания с помощью пакета прикладных программ Excel и Statistica исходных данных в виде линейных, логарифмических, степенных и экспоненциальных зависимостей и последующего выбора среди них функций с наибольшим коэффициентом корреляции R^2. При сравнении и анализе результатов па-

раллельных серий опытов, например при оценке геометрических показателей зёрен, получаемых вручную и с помощью разработанных ПрЭВМ, производилась проверка на адекватность по критерию Фишера.

Из полученных результатов видно, что независимо от марки и зернистости абразива, чем больше коэффициент формы у зёрен, тем больше площадь их поверхности. Так, например, с увеличением коэффициентов формы у зёрен нормального электрокорунда 13А 63Н (F30) от $K_ф$=1,81 до $K_ф$=3,13 (при среднем $D_{вп}$=690 мкм) площадь поверхности зёрен увеличивается на 4,3% с 2,205 до 2,299 мм^2. Следовательно, зёрна пластинчато-игольчатых разновидностей обладают несколько большей площадью соприкосновения со связкой, чем зёрна иных форм и прочность их соединения, например, с полимерными связками должна быть выше, чем у других разновидностей зёрен.

Дополнительным подтверждением этого тезиса служит то, что форма зёрен также влияет на их количество в единице объёма шлифовального инструмента. Для выяснения этого влияния проведены исследования количества зёрен в насыпном объёме фракций абразива, отсортированных на вибросепараторе по параметру формы. С этой целью испытуемые зёрна насыпались в мерные емкости цилиндрической формы объёмами 0,25 см^3 и 0,05 см^3 соответственно для фракций абразивов 13А 63Н (F30) и 53С 32Н (F54). Размеры ёмкостей были выбраны из соображений свободного размещения зёрен на поверхности сканера. Зёрна исследуемой фракции из заполненной мерной ёмкости размещались на поверхности планшетного сканера отдельно друг от друга, после чего они сканировались и изображения обрабатывались программой для определения коэффициентов формы зёрен на плоскости [247]. Контролируемым выходным параметром в данном случае являлось количество зёрен. Средние объёмные коэффициенты формы зёрен во фракциях были определены ранее (п. 2.2).

Полученные результаты позволили получить графики зависимостей количества зёрен в насыпном объёме абразива от средних объёмных коэффициентов формы зёрен во фракциях (рисунок 2.9, *а, б*).



а) *б)*

Рисунок 2.9 – Зависимости количества зёрен в насыпном объёме от коэффициента их формы у фракций абразивов 13А 63Н (F30) (*а*) и 53С 32Н (F54) (*б*)

Выявленные зависимости (рисунок 2.9, *а*, *б*) выражаются экспоненциальными моделями следующего вида:

13А 63Н (F30): $N = 1876{,}5 \cdot e^{0{,}150 \cdot K_ф}$; $R^2=0{,}94$ (2.9)

53С 32Н (F54): $N = 20879 \cdot e^{0{,}260 \cdot K_ф}$; $R^2=0{,}98$ (2.10)

Результаты показывают, что увеличение коэффициента формы зёрен сопровождается существенным ростом их количества в единице насыпного объёма. Например, у нормального электрокорунда марки 13А 63Н (F30) переход от изометрических ($K_ф$=1,81) к игольчато-пластинчатым зёрнам ($K_ф$=3,13) сопровождается ростом их количества в единице объёма на 20%. Для более мелких зёрен карбида кремния черного марки 53С 32Н (F54) этот рост более значителен и составляет порядка 43% при переходе от изометрических ($K_ф$=1,87) к игольчато-пластинчатым зёрнам ($K_ф$=3,3).

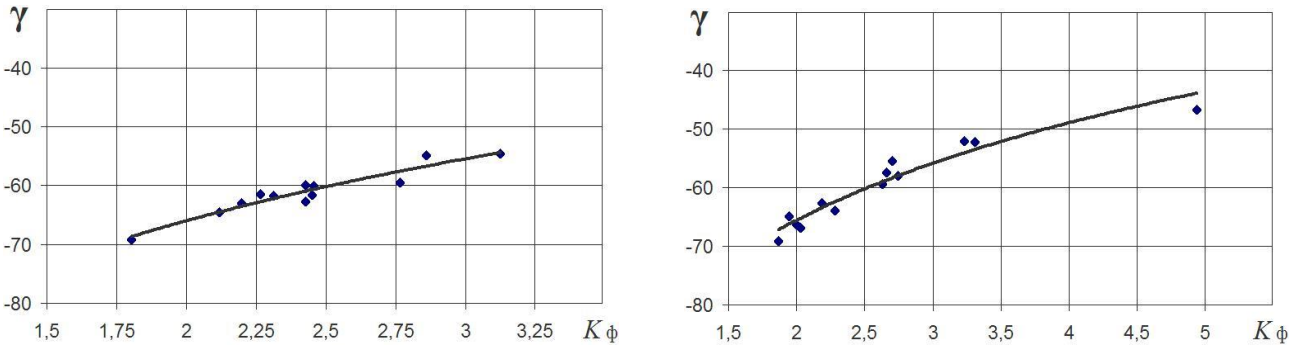
Суть установленных зависимостей, очевидно, распространяется и на готовые шлифовальные инструменты (в т.ч. на площадь контакта зёрен со связующим и на прочность композита абразив-связующее) при условии использования в процессе изготовления инструментов единой рецептуры, с неизменным объёмным соотношением абразива, связующих и наполнителей и при одинаковой плотности упаковки этих компонентов (одинаковом давление прессования).

2.5 Зависимость величин передних углов шлифовальных зёрен от факторов их формы, пространственной ориентации в теле инструмента и износа

Эффективность процесса резания шлифовальными зёрнами определяется физико-механическими свойствами абразивного материала, адгезией зёрен со связкой, а также геометрией зёрен. Геометрия зёрен, свою очередь, определяется их формой и расположением в теле инструментов, а также характером и величинами износа. Поэтому в данной работе были проведены исследования по установлению зависимостей величин передних углов шлифовальных зёрен от коэффициента их формы ($K_ф$), от угла пространственной ориентации (Θ) – угла между главной (наибольшей) осью зерна и плоскостью резания, а также от величины износа зёрен.

Для этого на первом этапе была разработана и зарегистрирована программа для ЭВМ «Геометрия шлифовальных зёрен» [238] (прил. 5, с. 353), позволяющая определять передние углы произвольно ориентированных шлифовальных зёрен. Алгоритм программы состоит в определении передних углов для всех точек контура шлифовального зерна, исходя из предположения, что каждая из этих точек может быть его вершиной и установлении среднего значения переднего угла γ для каждого исследуемого зерна. Для этого из каждой точки контура на проекции зерна строились касательные по смежным точкам, а также перпендикуляр к гипотетической плоскости резания, в качестве которого принималась линия между исследуемой точкой и центром максимально возможной описанной окружности вокруг проекции зерна. Передний угол, как известно, – это угол между перпендикуляром к плоскости резания и касательной к передней поверхности режущего клина, проведёнными из его вершины, и он не может быть по модулю больше или равен 90° (рисунок 1.2). В противном случае, применительно к шлифовальному зерну, исследуемая точка является элементом задней поверхности режущего клина. Поэтому значения углов, не удовлетворяющие указанному критерию, в расчёт средних передних углов исследуемых зёрен согласно алгоритму программы не принимались.

С помощью описанной программы были получены зависимости передних углов зёрен (γ) от коэффициента их формы ($K_ф$) для фракций абразива нормального электрокорунда 13А 63Н (F30) и карбида кремния чёрного 53С 32Н (F54) с упорядоченной формой, полученных вибросепарацией (рисунок 2.10, *а*, *б*).



а) *б)*

Рисунок 2.10 – Зависимости передних углов зёрен (γ) от коэффициента формы ($K_ф$) для фракций абразива 13А 63Н (F30) (*а*) и карбида кремния чёрного 53С 32Н (F54) (*б*) с упорядоченной формой, полученных на вибросепараторе

Выявленные зависимости (рисунок 2.10, *а*, *б*) выражаются логарифмическими моделями следующего вида:

13А 63Н (F30): $\gamma = -83{,}971 + 25{,}944 \cdot Ln(K_ф); \quad R^2 = 0{,}91$ (2.11)

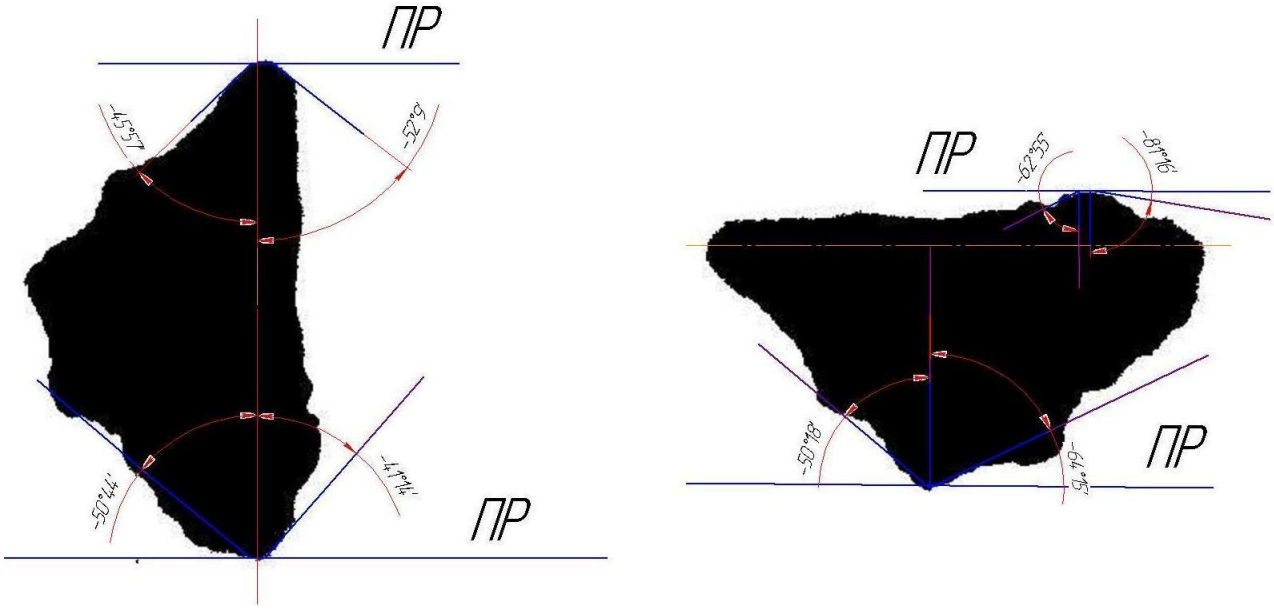
53С 32Н (F54): $\gamma = -82{,}136 + 23{,}966 \cdot Ln(K_ф); \quad R^2 = 0{,}94$ (2.12)

Анализ полученных результатов показывает, что у фракций электрокорунда 13А 63Н (F30) при переходе от $K_ф$=1,81 к $K_ф$=3,13 передний угол зёрен изменяется, в среднем, от –69°до –54°, а у карбида кремния 53С 32Н (F54) при переходе от $K_ф$=1,87 к $K_ф$=4,94 передний угол зёрен изменяется с –67° до –44°.

Таким образом, эмпирическим путём установлено, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зёрна, тем больше их передние углы, что подтверждается практическими результатами испытаний шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен (глава 5). Вместе с тем, полученные данные дают представление о величинах передних углов зёрен в инструментах с их неупорядоченным расположением. В связи с тем, что в представ-

ленной работе, в числе прочих, решались задачи по созданию шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами (глава 3, глава 6), то следующим шагом явилась разработка методик и программного обеспечения для оценки передних углов ориентированных шлифовальных зёрен.

Для проведения исследований передних углов с учетом параметра ориентации использованы зёрна нормального электрокорунда марки 13А 40Н (F46), форма которых количественно оценена в трёхмерном пространстве по методике, описанной в п. 2.2.. Оценка передних углов зёрен первоначально производилась без применения ЭВМ. На изображениях зёрен находили и прочерчивали их главные оси – т.е. линии между двумя наиболее отдалёнными точками на проекции зёрен. После этого осуществляли измерение передних углов по вершинам зёрен при их радиальной (Θ=90°) и тангенциальной (Θ=0°) ориентации. Для этого на вершинах зёрен проводили плоскости резания, перпендикуляры и касательные, после чего измеряли передние углы γ (рисунок 2.11, *а*, *б*).

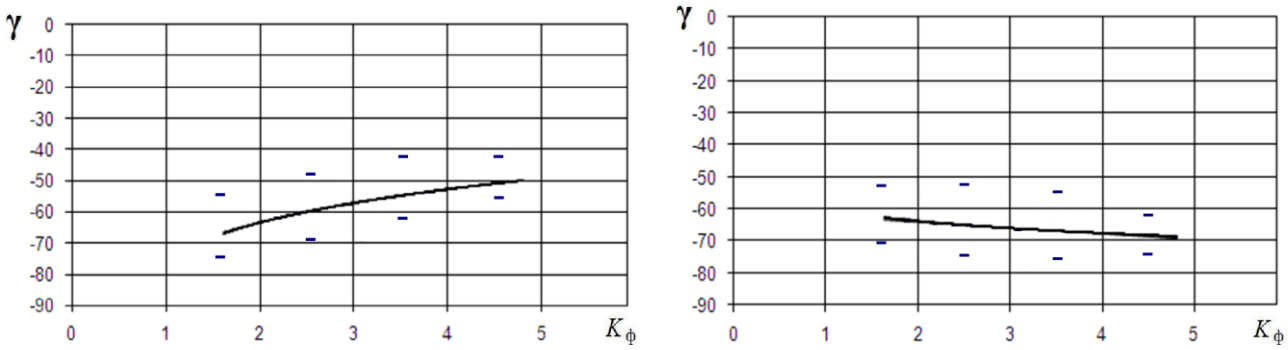


а) *б)*

Рисунок 2.11 – Измерение передних углов на вершинах шлифовальных зёрен при радиальной (*а*) и тангенциальной ориентации (*б*)

По указанному алгоритму передние углы определялись по двум проекциям исследуемых зёрен. Таким образом, для каждого зерна при заданном направлении ориентации получали 8 значений передних углов, на основе кото-

рых определялось среднее значение. Для повышения достоверности получаемых результатов были исследованы геометрические параметры 50 шлифовальных зёрен из указанной фракции (рисунок 2.12, *а*, *б*) [112].



а) *б)*

Рисунок 2.12 – Зависимости передних углов (γ) на вершинах шлифовальных зёрен марки 13А 40Н (F46) от коэффициента формы ($K_ф$) при их радиальной (*а*) и тангенциальной ориентации (*б*)

Выявленные зависимости (рисунок 2.12, *а*, *б*) выражаются логарифмическими моделями следующего вида:

$\Theta=90^\circ$: $\gamma = -74{,}11 + 15{,}38 \cdot Ln(K_ф)$; (2.13)

$\Theta=0^\circ$: $\gamma = -60{,}33 - 5{,}08 \cdot Ln(K_ф)$; (2.14)

Полученные результаты показывают, что при радиальной ориентации зёрен передние углы при их вершинах становятся больше с увеличением коэффициента формы. Так, при переходе от $K_ф$=1,6 до $K_ф$=4,8 передний угол изменяется с –66,5° до –50°. При тангенциальной ориентации зёрен наблюдается обратная картина, т.е. передние углы при вершинах зёрен с ростом коэффициента формы становятся меньше. Например, при переходе от $K_ф$=1,6 до $K_ф$=4,8 передний угол изменяется с –62,8° до –68,3°.

Полученные результаты свидетельствуют, что, помимо формы зёрен, на их геометрию существенное влияние оказывает пространственное расположение относительно плоскости резания. Кроме того, полученные данные, несмотря на явный характер, отличаются большим разбросом значений от зерна к зерну. Объясняется это тем, что исследование передних углов зёрен только по

вершинам не является полным и достаточным. Целесообразно оценивать их передние углы по всему контуру передней поверхности, так как зерно в процессе работы изнашивается и после удаления вершины в процессе резания начинают участвовать последующие элементы зерна с другими величинами передних углов. Поэтому была разработана методика, согласно которой на изображениях зёрен, полученных с помощью микроскопа и цифрового фотоаппарата, контуры зёрен разбивались на 12 ÷ 20 участков гипотетическими плоскостями резания (через 25 мкм истинного размера зерна по главной оси), и на этих участках проводилась оценка передних углов (рисунок 2.13) [110, 111].

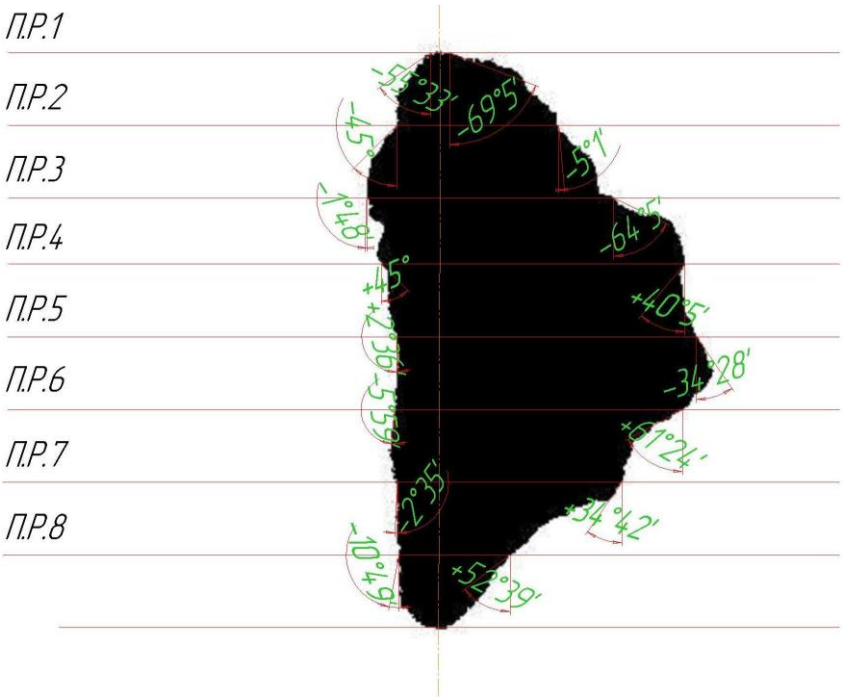


Рисунок 2.13 – Оценка величин передних углов радиально ориентированных шлифовальных зёрен по периметру их контура (вдоль главных осей)

Оценка передних углов производилась с предположением о том, что рабочей вершиной зерна при его радиальной ориентации может быть любая из двух его вершин. Т.е. после первого цикла определения передних углов, изображение зерна переворачивалось (зеркально сверху вниз) и цикл исследований повторялся. Кроме того, оценка производилась для каждого зерна по двум его проекциям. Таким образом, исследовалось по 4 изображения у каждого иссле-

дуемого зерна и получалось более 100 значений передних углов. Для повышения достоверности получаемых результатов были исследованы геометрические параметры 50 шлифовальных зерен марки 13А 40Н (F46). У каждого зерна определялся средний передний угол при гипотетическом износе от вершины до 1/3L, до 1/2L и до 2/3L по главной оси с образованием площадки износа. Полученные результаты заносились в таблицы формата Excel, на основе которых строились графики зависимости передних углов (γ) радиально ориентированных шлифовальных зёрен от коэффициента формы ($K_ф$) с учётом фактора износа (рисунок 2.14) и выводились математические модели (2.15 – 2.17).

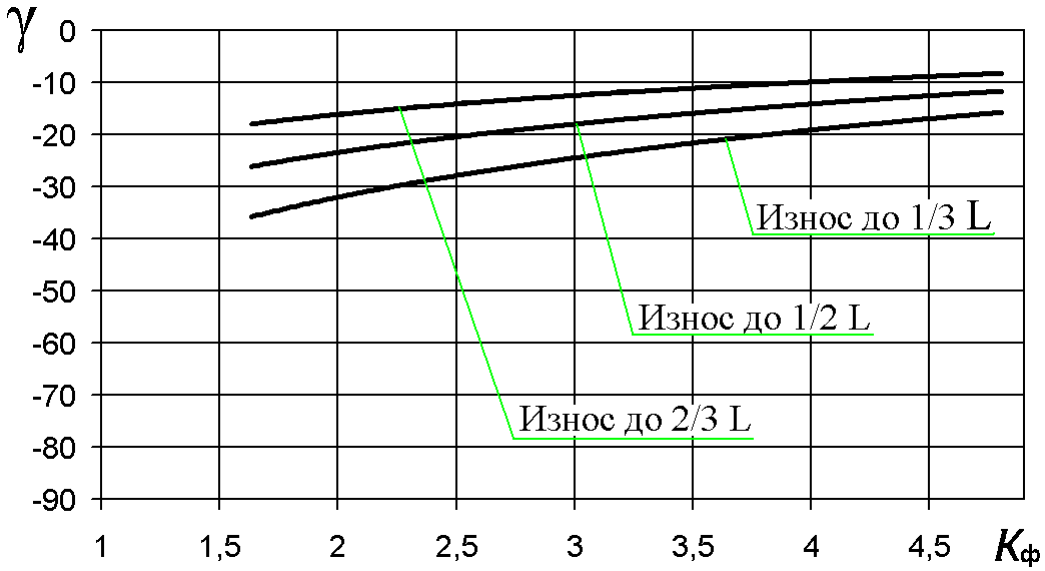


Рисунок 2.14 – Зависимости величин передних углов (γ) радиально ориентированных шлифовальных зёрен марки 13А 40Н (F46) от коэффициента формы ($K_ф$) с учётом фактора износа

Износ до 1/3L: $\gamma = -44{,}91 + 18{,}61 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}65;$ (2.15)

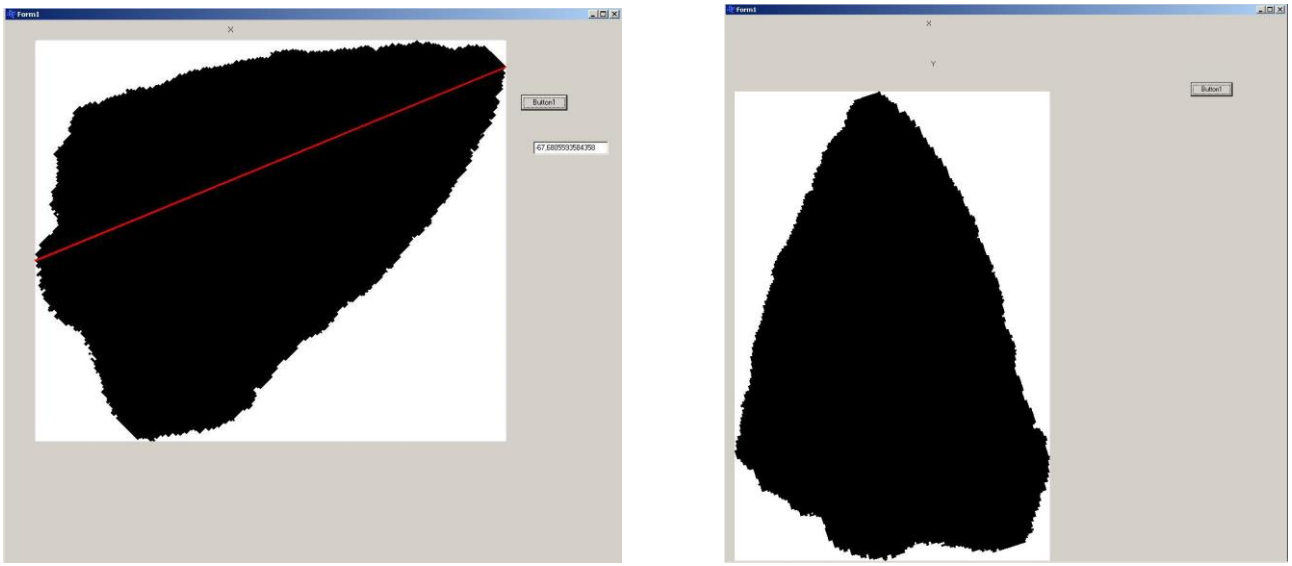
Износ до 1/2L: $\gamma = -32{,}69 + 13{,}41 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}54;$ (2.16)

Износ до 2/3L: $\gamma = -22{,}38 + 9{,}02 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}59.$ (2.17)

Полученные результаты свидетельствуют о том, что, независимо от величины износа, с ростом коэффициента формы радиально ориентированных шлифовальных зёрен их передние углы увеличиваются. При этом, чем дольше зерно работает, т.е. изнашивается вдоль главной оси с образованием площадки

износа и находится в теле инструмента, тем больше (в среднем) становится его передний угол. Так, при переходе от $K_ф$=1,6 до $K_ф$=4,8 и при износе от вершины до 1/3L по главной оси, передний угол зёрен варьируется в интервале –36° ÷ –16°. При износе от вершины до 1/2L γ находится в диапазоне –26° ÷ –12°; при износе до 2/3L – в диапазоне –18° ÷ –8°. То же самое происходит при аналогичном увеличении сечений стружек, срезаемых зёрнами.

В дальнейшем производилась оценка передних углов шлифовальных зёрен и при других вариантах их ориентации относительно плоскости резания. Для высокопроизводительной и точной оценки передних углов зёрен с учетом их формы, ориентации и износа разработан программный комплекс в составе трёх программ для ЭВМ: «Угол наклона шлифовальных зёрен» [243] (прил. 5, с. 354), «Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен» [241] (прил. 5, с. 355) и «Геометрические модели шлифовальных зёрен» [237] (прил.5, с. 356). Комплекс 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 гипотетического износа (рисунок 2.15, *а*, *б*) [146], а также получать геометрические модели зёрен для анализа их напряжённого состояния при работе (п. 2.6).



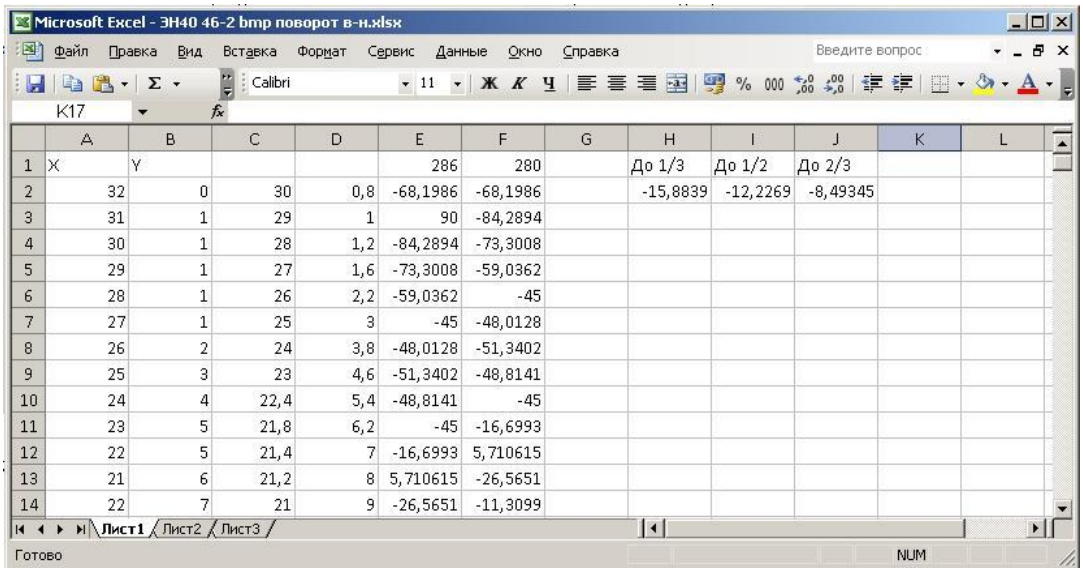
а) *б)*

Рисунок 2.15 – Интерфейс ПрЭВМ «Угол наклона шлифовальных зёрен» (*а*) и «Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен» (*б*)

Оценка угла наклона шлифовальных зёрен производится путём анализа в программе [243] их монохромных изображений. Определяется главная ось исследуемого зерна, т.е. линия между двумя наиболее удалёнными точками его изображения и оценивается угол наклона главной оси зерна по отношению к вертикальной плоскости. Оценка угла наклона зёрен производится с учётом направления их наклона, т.е. расположения вершины зерна в том или ином квадранте (рисунок 2.15, *а*). Полученные результаты сохраняются в виде таблиц формата Excel.

Далее с помощью стандартного графического редактора (например, «Microsoft Office Picture Manager») производится поворот изображений зёрен на требуемый угол относительно гипотетической плоскости резания, с учётом предварительно полученных данных с помощью ПрЭВМ «Угол наклона шлифовальных зёрен» [243].

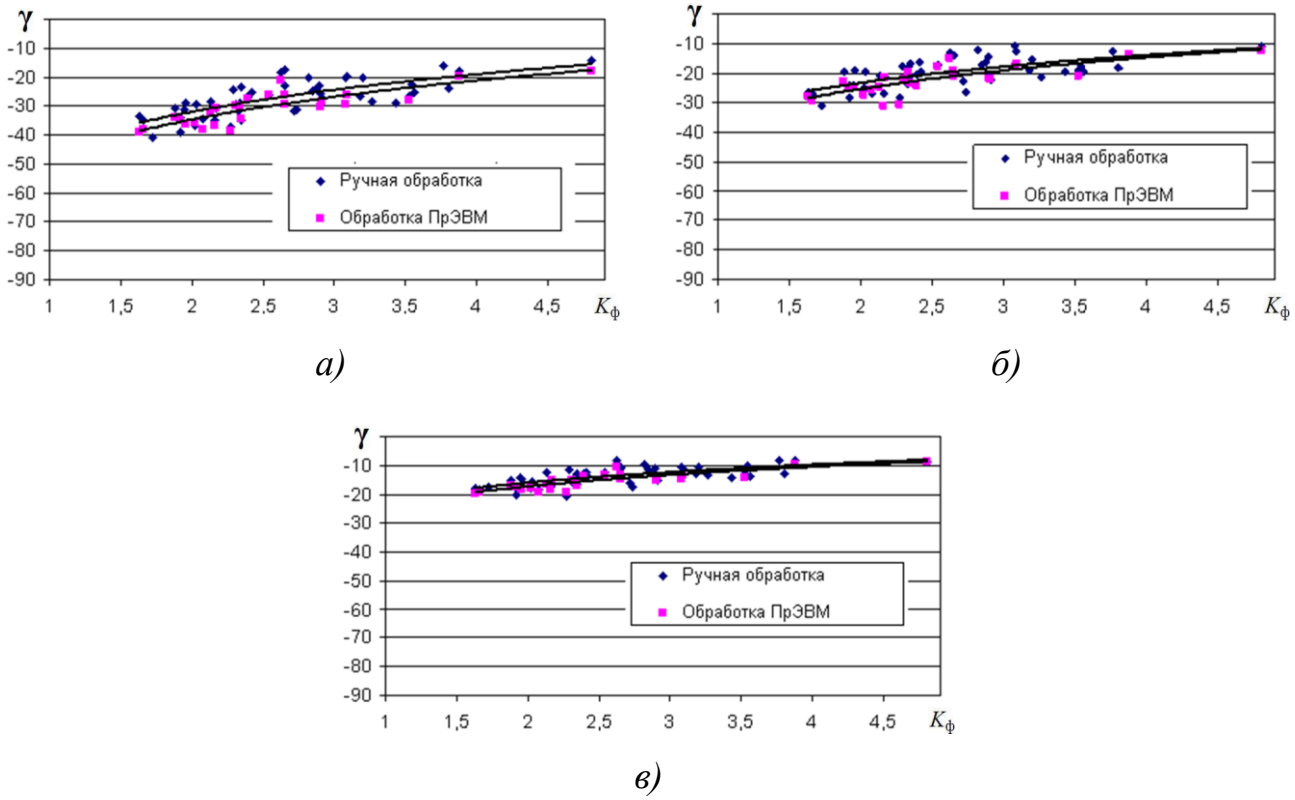
Программа для ЭВМ «Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен» (рисунок 2.15, *б*) [241] предназначена непосредственно для определения значений передних углов в каждой точке поверхности ориентированного зерна и их усреднения, исходя из условия гипотетического износа зерна от вершины до 1/3L, до 1/2L и до 2/3L по главной оси с образованием площадки износа, а также сохранения полученных данных в виде таблиц Excel (рисунок 2.16).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	X	Y			286	280		До 1/3	До 1/2	До 2/3		
2	32	0	30	0,8	-68,1986	-68,1986		-15,8839	-12,2269	-8,49345		
3	31	1	29	1	90	-84,2894						
4	30	1	28	1,2	-84,2894	-73,3008						
5	29	1	27	1,6	-73,3008	-59,0362						
6	28	1	26	2,2	-59,0362	-45						
7	27	1	25	3	-45	-48,0128						
8	26	2	24	3,8	-48,0128	-51,3402						
9	25	3	23	4,6	-51,3402	-48,8141						
10	24	4	22,4	5,4	-48,8141	-45						
11	23	5	21,8	6,2	-45	-16,6993						
12	22	5	21,4	7	-16,6993	5,710615						
13	21	6	21,2	8	5,710615	-26,5651						
14	22	7	21	9	-26,5651	-11,3099						

Рисунок 2.16 – Таблица результатов оценки передних углов ориентированного шлифовального зерна, полученная с помощью специального комплекса ПрЭВМ

Достаточно высокая точность функционирования программного комплекса подтверждена сравнительными измерениями передних углов радиально ориентированных зёрен 13А 40Н (F46) вручную и с помощью указанного комплекса (рисунок 2.17, *а*, *б*, *в*).



а) *б)*

в)

Рисунок 2.17 – Зависимости передних углов (γ) от коэффициента формы ($K_ф$) радиально ориентированных зёрен 13А 40Н (F46) при их гипотетическом износе от вершины до 1/3L (*а*), до 1/2L (*б*) и до 2/3L (*в*), полученные вручную и с помощью комплекса ПрЭВМ

Зависимости, представленные на рисунке 2.17 выражаются логарифмическими моделями следующего вида:

Гипотетический износ зёрен от вершины до 1/3L:

Ручная обработка: $\gamma = -44{,}91 + 18{,}61 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}65;$ (2.15)

Обработка ПрЭВМ: $\gamma = -48{,}04 + 19{,}32 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}71;$ (2.18)

Коэффициент Фишера (при уровне значимости 0,05): $F_{расч}=1{,}08 < F_{табл}=1{,}61$

Гипотетический износ зёрен от вершины до 1/2L:

Ручная обработка: $\gamma = -32{,}69 + 13{,}41 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}54;$ (2.16)

Обработка ПрЭВМ: $\gamma = -36{,}02 + 15{,}26 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}61$; (2.19)

Коэффициент Фишера (при уровне значимости 0,05): $F_{расч}=0{,}93 < F_{табл}=1{,}61$

Гипотетический износ зёрен от вершины до 2/3L:

Ручная обработка: $\gamma = -22{,}38 + 9{,}02 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}59$; (2.17)

Обработка ПрЭВМ: $\gamma = -24{,}20 + 9{,}78 \cdot Ln(K_ф)$ $R^2 = 0{,}71$; (2.20)

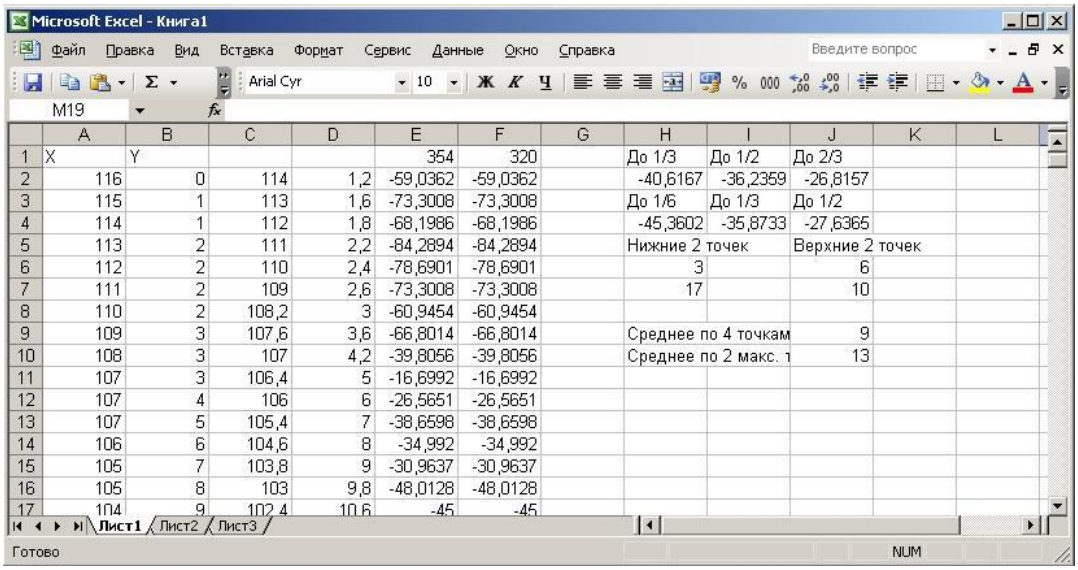
Коэффициент Фишера (при уровне значимости 0,05): $F_{расч}=1{,}1 < F_{табл}=1{,}61$

Полученные данные (рисунок 2.17, *а*, *б*, *в*) свидетельствуют о том, что результаты оценки передних углов ориентированных шлифовальных зёрен с помощью разработанного программного комплекса адекватны данным, получаемым при ручной обработке, что подтверждается оценкой по критерию Фишера. Кроме того, коэффициент корреляции зависимостей, получаемых с помощью ПрЭВМ, выше, чем при ручной обработке, что свидетельствует о более высокой точности автоматизированной обработки данных.

С целью дополнительного сокращения времени и трудоёмкости оценки передних углов шлифовальных зёрен, разработана и реализована методика, основанная на построении в графическом редакторе моделей зёрен с различными коэффициентами формы и определения с помощью них величин средних передних углов при различных углах ориентации и степени износа.

Исходными данными для построения моделей зёрен являются результаты оценки передних углов радиально ориентированных шлифовальных зёрен из исследуемой фракции, получаемые с помощью специально разработанной программы для ЭВМ «Геометрические модели шлифовальных зёрен» [237] (прил. 5, с. 356), которая создана на основе ПрЭВМ «Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен», описанной ранее (рисунок 2.15, *б*, рисунок 2.16) [241]. Здесь для каждой точки контура ориентированного шлифовального зерна также определяется передний угол. Кроме того, исследуемые зёрна разбиваются на шесть равных участков вдоль главной оси. Для каждого участка подсчитывается средний передний угол. Производятся замеры величин площадок задних поверхностей на вершинах шлифовальных зёрен (рисунок 2.18). Полученные данные заносятся в таблицы формата Excel, на основе которых строятся зависимо-

сти передних углов и размеров площадок задних поверхностей от коэффициента формы зёрен. Полученные зависимости позволяют построить модели шлифовальных зёрен с различными коэффициентами формы.

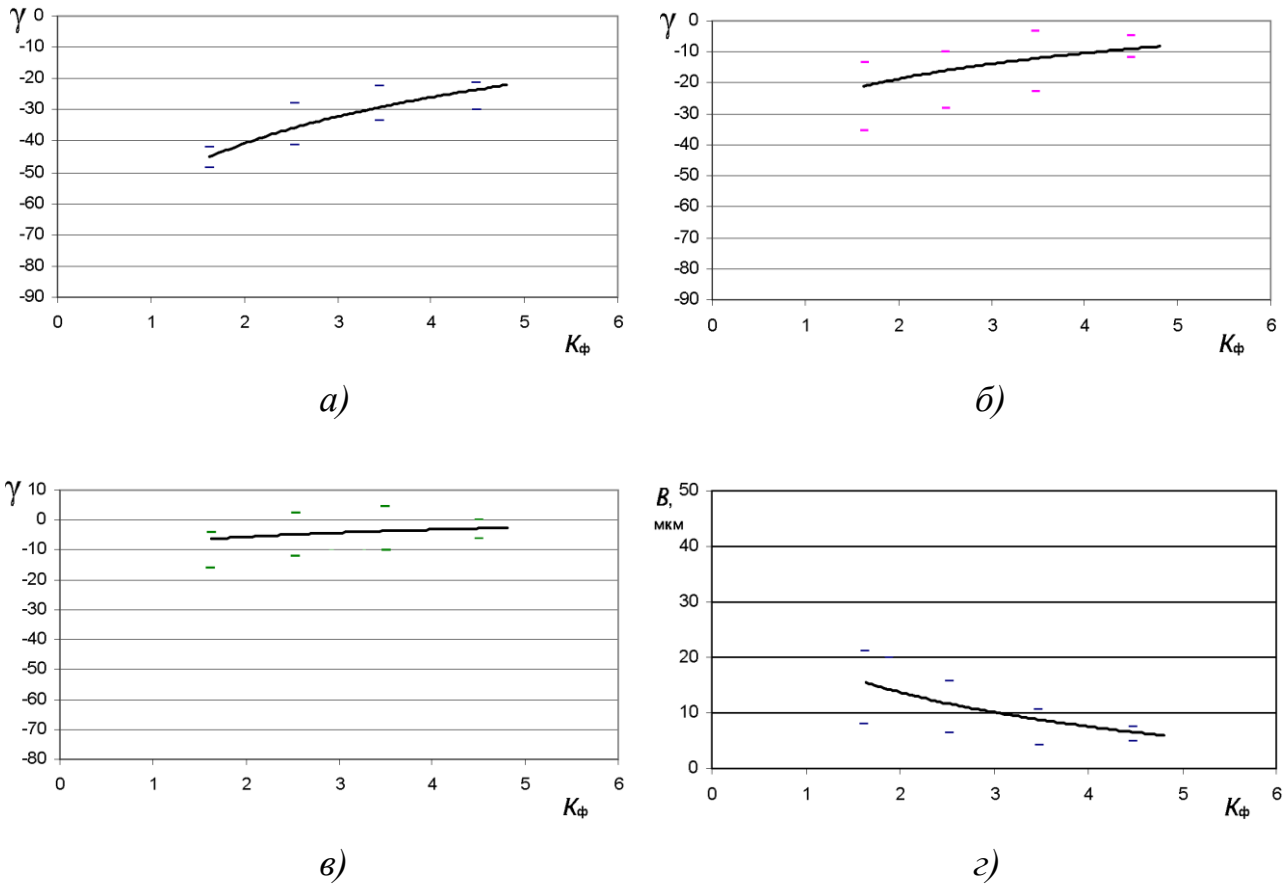


	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	X	Y			354	320		До 1/3	До 1/2	До 2/3		
2	116	0	114	1,2	-59,0362	-59,0362		-40,6167	-36,2359	-26,8157		
3	115	1	113	1,6	-73,3008	-73,3008		До 1/6	До 1/3	До 1/2		
4	114	1	112	1,8	-68,1986	-68,1986		-45,3602	-35,8733	-27,6365		
5	113	2	111	2,2	-84,2894	-84,2894		Нижние 2 точек		Верхние 2 точек		
6	112	2	110	2,4	-78,6901	-78,6901		3		6		
7	111	2	109	2,6	-73,3008	-73,3008		17		10		
8	110	2	108,2	3	-60,9454	-60,9454						
9	109	3	107,6	3,6	-66,8014	-66,8014		Среднее по 4 точкам		9		
10	108	3	107	4,2	-39,8056	-39,8056		Среднее по 2 макс. т		13		
11	107	3	106,4	5	-16,6992	-16,6992						
12	107	4	106	6	-26,5651	-26,5651						
13	107	5	105,4	7	-38,6598	-38,6598						
14	106	6	104,6	8	-34,992	-34,992						
15	105	7	103,8	9	-30,9637	-30,9637						
16	105	8	103	9,8	-48,0128	-48,0128						
17	104	9	102,4	10,6	-45	-45						

Рисунок 2.18 – Таблица результатов оценки передних углов на всех точках контура и на характерных участках ориентированного шлифовального зерна, полученная с помощью ПрЭВМ «Геометрические модели шлифовальных зёрен»

С помощь ПрЭВМ «Геометрические модели шлифовальных зёрен» установлены величины передних углов на характерных участках контура и величины площадок задних поверхностей на вершинах у 50 радиально ориентированных шлифовальных зёрен марки 13А 40Н (F46). На основе полученных данных построены графики зависимостей передних углов (γ) и величин площадок задних поверхностей (*B*) от коэффициента формы зёрен (рисунок 2.19, *а*, *б*, *в*, *г*), а также описывающие их математические модели (2.21 ÷ 2.24).

Полученные зависимости (2.21 ÷ 2.24) позволили, соблюдая масштабный коэффициент, строить в графическом редакторе «Компас» модели шлифовальных зёрен с различными коэффициентами формы. В исследуемой фракции зёрен коэффициенты их формы варьируются в пределах $K_ф$=1,6÷4,8. При построении графических моделей была осуществлена подробная разбивка указанного диапазона через 0,2 и построены модели зёрен с коэффициентами формы $K_ф$ = 1,6; 1,8; 2,0;…..4,8, некоторые из которых представлены на рисунке 2.20.



а) *б)*

в) *г)*

Рисунок 2.19 – Зависимости средних передних углов (γ) от коэффициента формы ($K_ф$) радиально ориентированных зёрен 13А 40Н (F46) на участках от вершины до 1/6L (*а*), от 1/6L до 2/6L (*б*), от 2/6L до 3/6L (*в*) вдоль главных осей и величин площадок на вершинах зёрен (*B*, мкм) от их коэффициента формы (*г*)

Участок от вершины до 1/6L: $\gamma = -55{,}579 + 21{,}339 \cdot Ln(K_ф)$ (2.21)

Участок от 1/6L до 2/6L: $\gamma = -27{,}014 + 11{,}956 \cdot Ln(K_ф)$ (2.22)

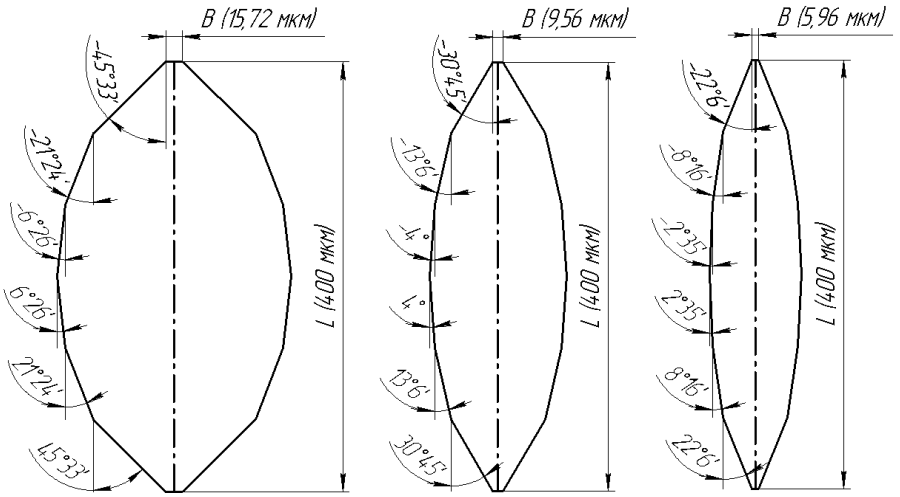
Участок от 2/6L до 3/6L: $\gamma = -8{,}067 + 3{,}492 \cdot Ln(K_ф)$ (2.23)

ЗП при вершине зёрен (*B*, мкм): $B = 19{,}904 - 8{,}889 \cdot Ln(K_ф)$ (2.24)

Для ускоренного построения моделей зёрен по получаемым данным была разработана и зарегистрирована программам для ЭВМ «Графическое построение геометрических моделей шлифовальных зёрен» [239] (прил. 5, с. 357).

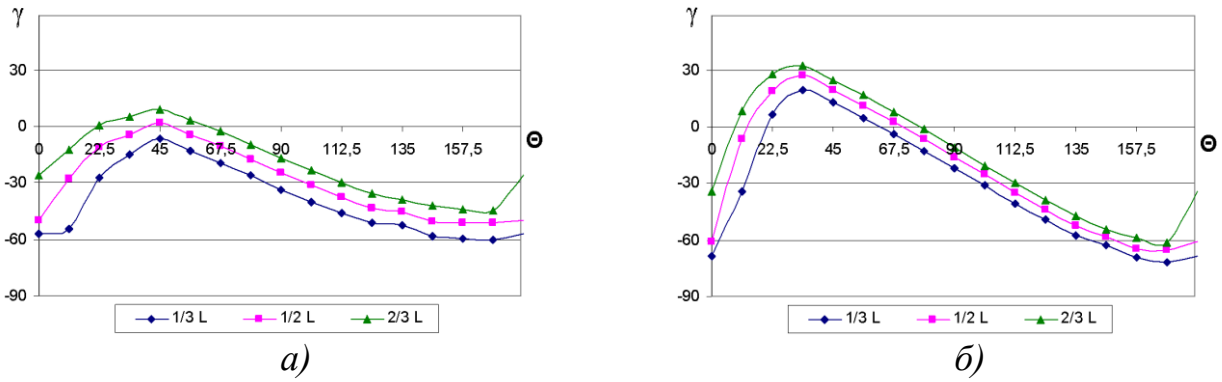
Каждую из полученных моделей зёрен с определённым $K_ф$ располагали в редакторе «Компас» под различными углами ориентации через 11°15' в диапазоне Θ=0°…180°. После этого с помощью программы для ЭВМ «Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен» [241] определяли средние передние

угол моделей зёрен при их гипотетическом износе от вершины до 1/3L, до 1/2L и до 2/3L с образованием площадки износа. Полученные результаты отражены в виде графиков зависимости передних углов зёрен (γ) от коэффициента формы ($K_ф$) и угла ориентации (Θ) (рисунок 2.21, рисунок 2.22) [134].

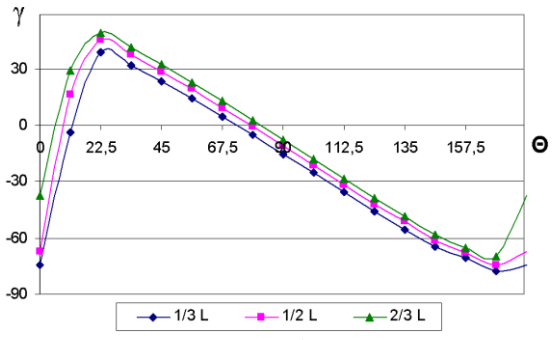


а) *б*) *в*)

Рисунок 2.20 – Модели зёрен нормального электрокорунда 13А 40Н (F46) с различными коэффициентами формы: $K_ф$=1,6 (*а*); $K_ф$=3,2 (*б*); $K_ф$=4,8 (*в*)



а) *б)*



в)

Рисунок 2.21 – Зависимости передних углов (γ) моделей зёрен 13А 40Н (F46) с $K_ф$=1,6 (*а*), $K_ф$=3,2 (*б*), $K_ф$=4,8 (*в*) от угла ориентации относительно плоскости резания (Θ) с учётом фактора гипотетического износа

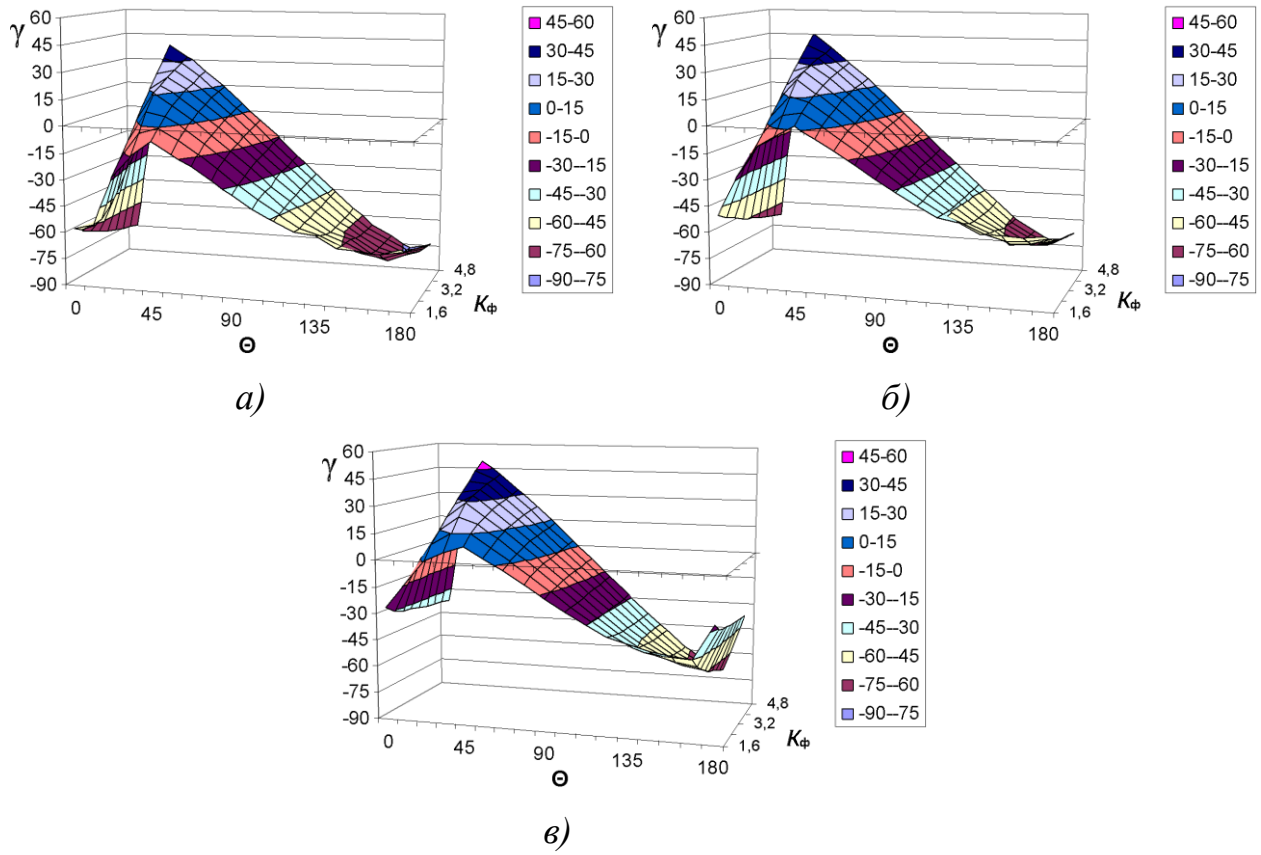


Рисунок 2.22 – Зависимости передних углов (γ) моделей зёрен 13А 40Н (F46) от их коэффициента формы ($K_ф$) и угла ориентации (Θ) относительно плоскости резания при их гипотетическом износе до 1/3L (*а*), до 1/2L (*б*) и до 2/3L (*в*)

Результаты исследований позволяют констатировать, что форма и ориентации зёрен относительно плоскости резания весьма существенно влияют на величины их передних углов. Так, например, при $K_ф$=1,6 передние углы зёрен в зависимости от угла ориентации Θ варьируются в пределах –60° ÷ –6° (износ до 1/3L) и –44° ÷ +9° (износ до 2/3L). При $K_ф$=4,8 передние углы изменяются в диапазоне –77° ÷ +39° (износ до 1/3L) и –69° ÷ +49° (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° ÷ 54° у изометрических зёрен ($K_ф$=1,6) и 116° ÷ 118° у игольчато-пластинчатых зёрен ($K_ф$=4,8), что принципиально различает геометрию абразивных и лезвийных инструментов, где у последних режущий клин имеет неизменную геометрию и затачивается с точностью до долей градуса.

Установлено также, что в зависимости от угла ориентации при увеличении $K_ф$ зёрен может происходить как увеличение, так и уменьшение их передних углов. Так, с увеличением $K_ф$ зёрен в диапазоне углов ориентации Θ=10°÷125° их передние углы возрастают. У тангенциально ориентированных зёрен (Θ=0°(180°)) и зёрен с близкими направлениями ориентации (Θ=135°÷180°) наблюдается обратная картина. Кроме того, независимо от $K_ф$ и Θ, чем дольше зерно изнашивается с образованием площадки износа, тем больше его передний угол. Аналогичным образом происходит увеличение передних углов зёрен с ростом сечений срезаемых стружек.

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

Математический анализ полученных данных (рисунок 2.22) показывает, что передние углы шлифовальных зёрен соотносятся с коэффициентами их формы и углами ориентации посредством сложных синусоидальных зависимостей, а именно тригонометрических рядов с периодом π следующего вида:

Износ до 1/2L:

$$\gamma = a_0/2 + a_1 \cdot \cos(1 \cdot 2 \cdot \Theta) + b_1 \cdot \sin(1 \cdot 2 \cdot \Theta) + \ldots + a_8 \cdot \cos(8 \cdot 2 \cdot \Theta) + b_8 \cdot \sin(8 \cdot 2 \cdot \Theta) \quad (2.25)$$

где:

$$a_0 = 0{,}111 \cdot K_ф^4 - 1{,}499 \cdot K_ф^3 + 6{,}841 \cdot K_ф^2 - 4{,}967 \cdot K_ф - 61{,}257$$

$$a_1 = 0{,}092 \cdot K_ф^4 - 1{,}463 \cdot K_ф^3 + 8{,}790 \cdot K_ф^2 - 23{,}633 \cdot K_ф + 12{,}509$$

$$b_1 = -0{,}074 \cdot K_ф^4 + 1{,}333 \cdot K_ф^3 - 9{,}674 \cdot K_ф^2 + 37{,}149 \cdot K_ф - 16{,}158$$

$$a_2 = -0{,}038 \cdot K_ф^4 + 0{,}284 \cdot K_ф^3 + 0{,}036 \cdot K_ф^2 - 4{,}863 \cdot K_ф + 0{,}643$$

$$b_2 = 0{,}027 \cdot K_ф^4 - 0{,}342 \cdot K_ф^3 + 1{,}136 \cdot K_ф^2 + 4{,}499 \cdot K_ф - 5{,}696$$

$$a_3 = -0{,}083 \cdot K_ф^4 + 0{,}963 \cdot K_ф^3 - 3{,}574 \cdot K_ф^2 + 2{,}528 \cdot K_ф - 0{,}842$$

$$b_3 = -0{,}009 \cdot K_ф^4 - 0{,}025 \cdot K_ф^3 + 1{,}079 \cdot K_ф^2 - 1{,}866 \cdot K_ф + 0{,}650$$

$$a_4 = -0{,}062 \cdot K_ф^4 + 0{,}901 \cdot K_ф^3 - 4{,}665 \cdot K_ф^2 + 8{,}141 \cdot K_ф - 5{,}247$$

$$b_4 = -0{,}071 \cdot K_ф^4 + 0{,}772 \cdot K_ф^3 - 2{,}492 \cdot K_ф^2 + 3{,}120 \cdot K_ф - 1{,}065$$

$$a_5 = -0{,}014 \cdot K_ф^4 + 0{,}459 \cdot K_ф^3 - 3{,}888 \cdot K_ф^2 + 10{,}692 \cdot K_ф - 10{,}291$$

$$b_5 = -0{,}057 \cdot K_ф^4 + 0{,}655 \cdot K_ф^3 - 2{,}498 \cdot K_ф^2 + 4{,}002 \cdot K_ф - 2{,}139$$

$$a_6 = 0{,}023 \cdot K_ф^4 - 0{,}098 \cdot K_ф^3 - 0{,}906 \cdot K_ф^2 + 4{,}543 \cdot K_ф - 6{,}396$$

$$b_6 = 0{,}023 \cdot K_ф^4 - 0{,}317 \cdot K_ф^3 + 1{,}446 \cdot K_ф^2 - 2{,}293 \cdot K_ф + 0{,}975$$

$$a_7 = 0{,}040 \cdot K_ф^4 - 0{,}590 \cdot K_ф^3 + 3{,}291 \cdot K_ф^2 - 8{,}768 \cdot K_ф + 7{,}250$$

$$b_7 = 0{,}055 \cdot K_ф^4 - 0{,}701 \cdot K_ф^3 + 3{,}039 \cdot K_ф^2 - 5{,}073 \cdot K_ф + 2{,}581$$

$$a_8 = 0{,}021 \cdot K_ф^4 - 0{,}371 \cdot K_ф^3 + 2{,}522 \cdot K_ф^2 - 7{,}644 \cdot K_ф + 7{,}286$$

$$b_8 = 0{,}012 \cdot K_ф^4 - 0{,}011 \cdot K_ф^3 - 0{,}439 \cdot K_ф^2 - 2{,}896 \cdot K_ф + 2{,}029$$

2.6 Методика и результаты оценки напряжённого состояния зёрен в процессе резания с учётом факторов их формы, пространственной ориентации и глубины заделки в связку

Прочность зёрен напрямую влияет на износ и режущую способность шлифовальных инструментов и зависит от ряда факторов, в числе которых: физико-механические свойства абразивных материалов, глубина заделки зёрен в связку, зернистость, номер структуры, характер воздействия силовой нагрузки, схема шлифования, форма инструментов и др. В том числе на прочность зёрен влияет геометрия их режущей части, которая, в свою очередь, определяется их формой и расположением в теле инструментов, а также характером износа и оказывает существенное влияние на эффективность процесса резания. В этом контексте представляется полезным исследовать взаимосвязь формы и ориентации шлифовальных зёрен, а также глубины заделки в связку с величинами напряжений, которые возникают в зёрнах при работе.

Исследования проводились на примере зёрен нормального электрокорунда марки 13А 40Н (F46), для которых на первом этапе произведена количественная оценка формы в трёхмерном пространстве, установлены величины передних углов зёрен при различных вариантах их ориентации и коэффициентах формы, а также построены модели шлифовальных зёрен, пригодные для прочностных расчётов (п. 2.5).

Далее определялись составляющие силы резания, действующие на зёрна 13А 40Н (F46) при работе специально изготовленных отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×4×32 13А F46 S BF 80 м/с (230×4×32 13А 40Н Т2 БУ 80 м/с). Кругами осуществлялась разрезка заготовок (труб 21,3×2,8 из стали 10) на скорости V=80 м/с с постоянным усилием прижатия между заготовкой и инструментом F=32 Н (P_y=32 Н). В процессе разрезки заготовок среди прочих показателей определялась эффективная мощность резания, исходя из величины которой была установлена тангенциальная составляющая силы резания (P_z=8,46 Н).

После этого цифровым фотоаппаратом в режиме макросъёмки фотографировались участки рабочей поверхности шлифовальных кругов и производился подсчёт количества зёрен на единице площади поверхности инструментов в графическом редакторе «Paint» (рисунок 2.23).

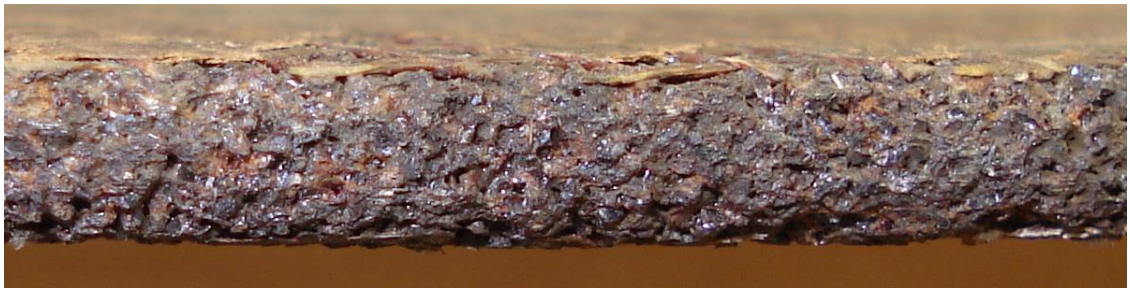


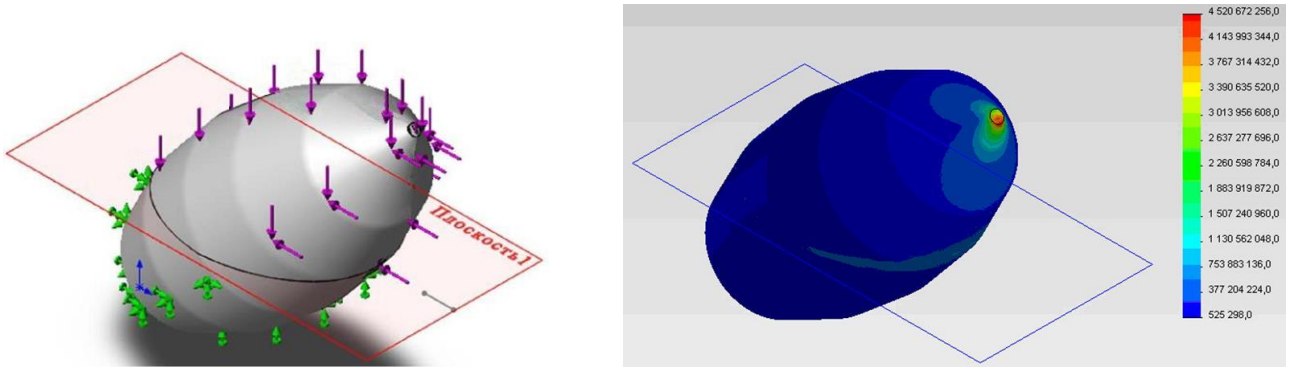
Рисунок 2.23 – Участок рабочей поверхности отрезного круга Тип 41 230×4×32 13А F46 S BF 80 м/с

Установлено, что в среднем на рабочей поверхности исследуемых шлифовальных кругов число зёрен составляет N_s=2,68 зёрен/мм^2. Исходя из этой величины, а также из площади контакта круга с обрабатываемой заготовкой (S=22,4 мм^2), установлено количество шлифовальных зёрен, одновременно участвующих в работе (N_s=60 зёрен), и определены величины составляющих силы резания, действующие на единичное шлифовальное зерно на поверхности круга (P_y=0,533 Н; P_z=0,141 Н).

Полученные данные позволили произвести расчёт напряжений в моделях шлифовальных зёрен марки 13А 40Н (F46) с различными коэффициентами формы и вариантами ориентации в теле инструмента методом конечных эле-

ментов в программном комплексе «SolidWorks». Первой была исследована модель зерна с коэффициентом формы $K_ф$ = 2,4, т.е. наиболее близким к среднеарифметическому коэффициенту формы зёрен во фракции (рисунок 2.24).

Программные настройки при проведении расчётов: линейная упругая изотропная модель; материал – нормальный электрокорунд; предел прочности при растяжении $8{,}5 \cdot 10^7$ Н/м^2; предел прочности при сжатии $7{,}6 \cdot 10^8$ Н/м^2; модуль упругости $3{,}74 \cdot 10^{11}$ Н/м^2; коэффициент Пуассона 0,22; массовая плотность 4025 кг/м^3; модуль сдвига $1{,}5 \cdot 10^{11}$ Н/м^2; коэффициент теплового расширения $8 \cdot 10^{-6}$ 1/K. 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, используемый для хрупких материалов.



а) *б)*

Рисунок 2.24 – Схема нагружения (*а*) и картина напряжений (*б*) в модели шлифовального зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=2,4 и углом ориентации Θ=45º, закреплённой в связке до 1/2L

Полученные результаты показывают, что при всех вариантах ориентации зёрен наиболее нагруженной их частью является зона вблизи вершин. Следующая по нагруженности зона находится вблизи границы заделки зерна в связку.

Сравнение полученных данных по величинам напряжений, возникающих при различных вариантах ориентации зёрен (рисунок 2.25) с данными по величинам их передних углов (рисунок 2.26) позволяет сформулировать рекомендации по рациональному ориентированию зёрен в шлифовальных инструментах.

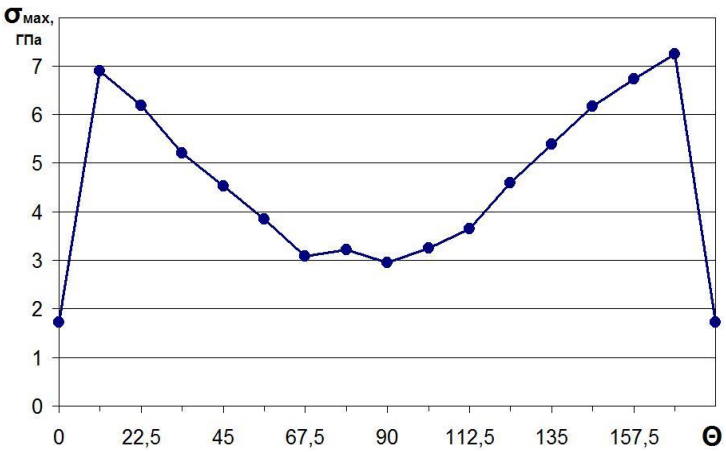


Рисунок 2.25 – Зависимость максимальных напряжений (σ_{max}) на вершинах модели зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=2,4, закреплённой в связке до 1/2L, от угла ориентации (Θ)

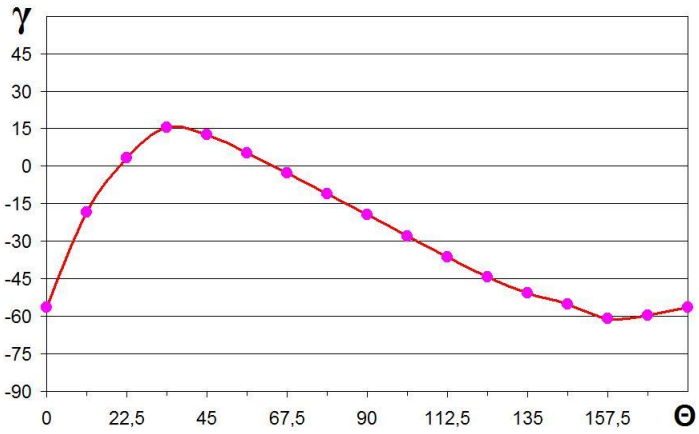


Рисунок 2.26 – Зависимость передних углов (γ) у модели шлифовального зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=2,4, закреплённой в связке до 1/2L, от угла ориентации (Θ).

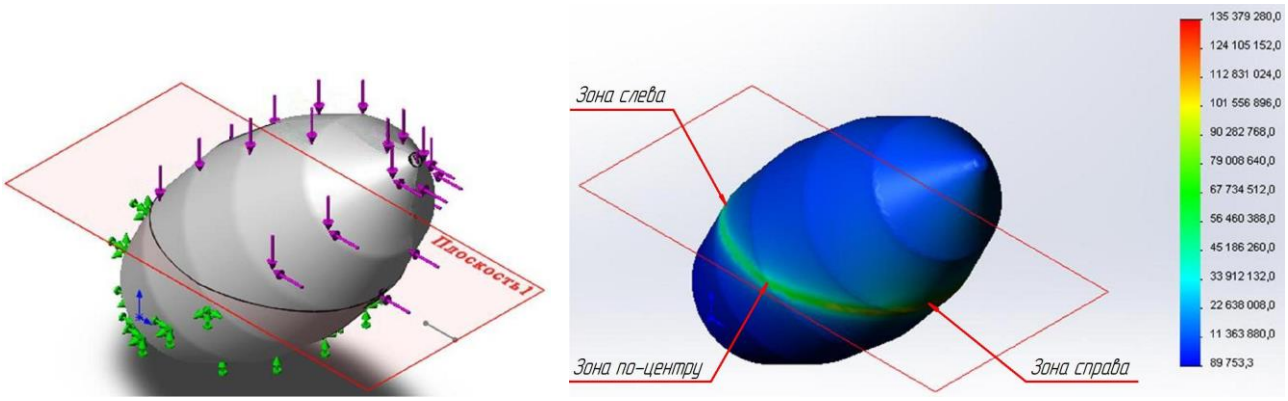
Из полученных данных следует, что наименьшие напряжения возникают в зерне при его тангенциальной ориентации, т.к. его вершина частично заделана в связку. Несколько большие, но весьма близкие значения напряжений наблюдаются при углах ориентации 67,5÷90°. Чем больше угол Θ отличается от указанного диапазона, тем большие напряжения возникают в зерне. При этом, во всех случаях, более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу тангенциальной составляющей силы резания P_z.

Наибольшие значения передних углов зёрен наблюдаются в диапазоне ориентации Θ=11º÷90º.

Таким образом, совместно анализируя полученные данные (рисунок 2.25 и рисунок 2.26), можно сделать вывод, что рациональный интервал ориентирования зёрен составляет Θ=67,5º÷90º. Следует также отметить, что полученная картина напряжений, в основном, характеризует контактные напряжения на вершинах зёрен и отражает интенсивность процессов их микроскалывания.

Для определения объёмной прочности зёрен проведены исследования по оценке напряжённого состояния на границе их заделки в связку. Для этого, в связи с особенностями функционирования программного комплекса «SolidWorks», контур моделей зёрен (рисунок 2.24) преобразован по характерным точкам в единую криволинейную поверхность без разбивки на секторы. К полученной модели зерна прикладывались силы, действующие на реальное единичное шлифовальное зерно (P_y=0,533 Н; P_z=0,141 Н), при различных вариантах ориентации и заделки в связку. При этом установлено, что, в зависимости от конкретного варианта ориентации, максимальные напряжения возникают на различных участках модели зерна по границе заделки в связку.

Для более полного представления о напряженном состоянии модели шлифовального зерна при всех вариантах её ориентации снимались и анализировались данные в трёх характерных зонах по границе заделки зерна в связку: слева, по-центру и справа (рисунок 2.27, рисунок 2.28).



а) *б)*

Рисунок 2.27 – Схема нагружения (*а*) и картина напряжений по границе заделки в связку (*б*) в модели шлифовального зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=2,4 и углом ориентации Θ=45º, до 1/2L закреплённой в связке.

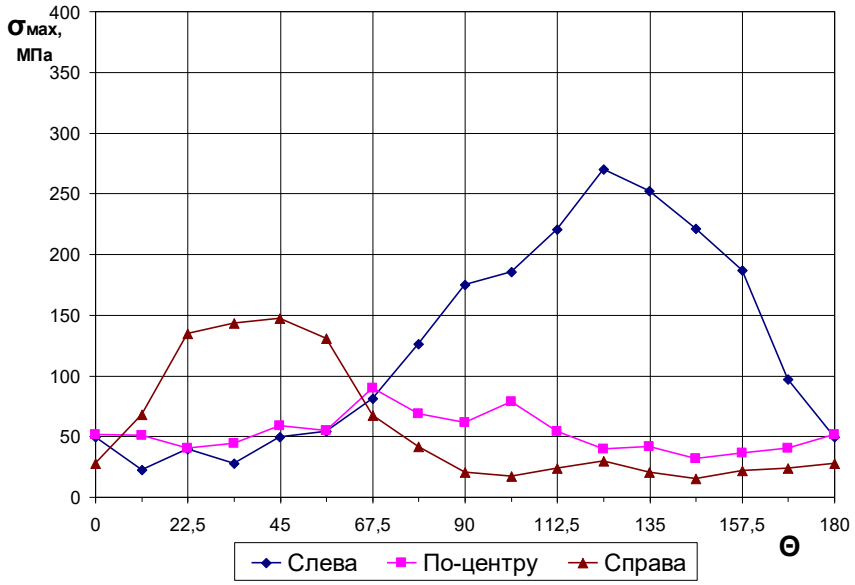


Рисунок 2.28 – Напряжения в модели шлифовального зерна 13А 40Н (F46), закреплённой до 1/2L, с $K_ф$=2,4 по границе заделки в связку при различных углах ориентации.

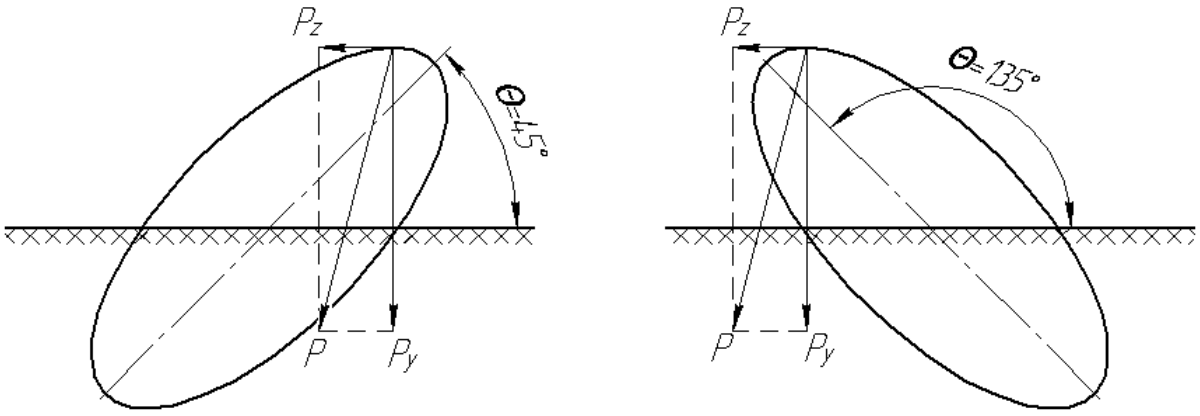
Данные графика (рисунок 2.28) показывают, что наименьшие напряжения возникают в зёрнах по границе заделки в связку при их тангенциальной ориентации. Далее, в диапазоне от Θ=5° до Θ=45° происходит существенный рост напряжений, при этом максимальные значения достигаются в «зоне справа» под консолью выступающей части зерна. В следующем диапазоне от Θ=45° до Θ=67,5° происходит снижение максимальных напряжений до значений, приближённых к варианту тангенциальной ориентации (Θ=0°). При этом, очевидно, что снижение максимальных напряжений при Θ=67,5° происходит в результате равномерного распределения напряжений в объёме зерна (слева, по-центру и справа). В свою очередь, такое распределение напряжений достигается за счёт того, что угол ориентации зерна Θ=67,5° близок к направлению вектора силы резания *P*.

В данном случае составляющие силы резания (P_y=0,533 Н, P_z=0,141 Н) имеют соотношение 3,78 : 1 и вектор силы резания *P* совпадает с продольной осью зерна при его ориентации с Θ=75°. Расчёт и последующее сравнение напряжений для углов ориентации Θ=67,5° и Θ=75° показывают, что более ра-

циональным для снижения максимальных напряжений является угол ориентации Θ=67,5°, что объясняется особенностями заделки зерна в связку.

При дальнейшем увеличении угла ориентации в диапазоне от Θ=67,5°до Θ=124° происходит значительный рост напряжений до наибольших наблюдаемых значений. Максимально нагруженная зона здесь – «зона слева» под консолью выступающей части зерна.

Вместе с тем полученные данные показывают, что во всех случаях более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу направлению действия силы резания *P*. Это находит объяснение в том, что при ориентации зерна навстречу силе резания *P* главная ось зерна находится вблизи направления её действия, что способствует более равномерному распределению напряжений в теле зерна и снижению их максимальных значений. При расположении зерна вершиной по направлению действия составляющей силы резания P_z напряжения в зерне распределяются особенно неравномерно, концентрируясь и чрезвычайно возрастая в «зоне слева» (рисунок 2.29).



а) *б)*

Рисунок 2.29 – Направление действия силы резания по отношению к главной оси зерна при его расположении вершиной навстречу (*а*) и вершиной по направлению действия вектора P_z (*б*)

Аналогичные по характеру распределения данные (рисунок 2.28) получены при исследовании напряжений в моделях зерна при различных вариантах ориентации и закреплении в связке до 2/3L и до 1/3L. В результате их обобщения получен сводный график максимальных напряжений в модели шлифоваль-

ного зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=2,4 по границе заделки в связку при различных углах ориентации и глубинах закрепления в связке (рисунок 2.30) [122, 124].

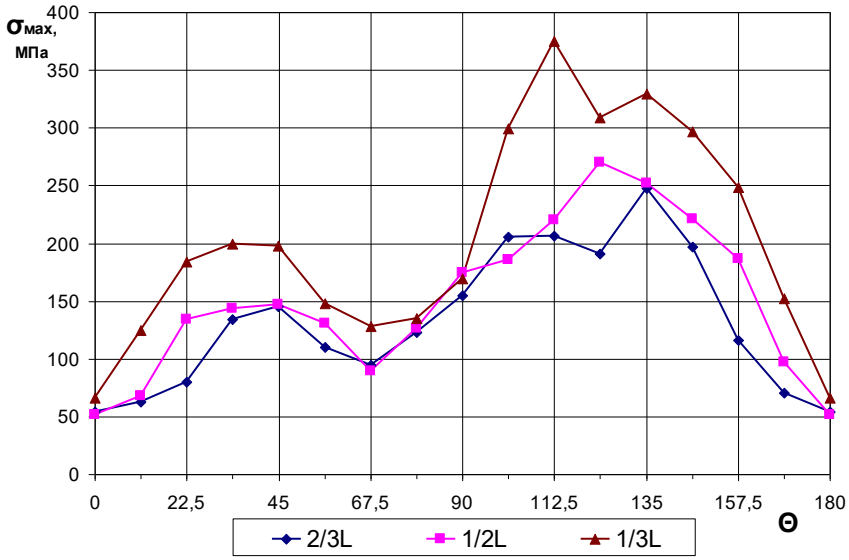


Рисунок 2.30 – Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=2,4 по границе заделки в связку при различных углах ориентации и при закреплении в связке на 2/3L, на 1/2L и на 1/3L.

Из графика (рисунок 2.30) следует, что, чем глубже закреплено зерно в связке, тем меньшие напряжения в нём возникают. При этом, разница в значениях напряжений при закреплении зерна в связке на 2/3L и до 1/2L невелика. Существенный рост напряжений наблюдается при переходе к закреплению зерна в связке на 1/3L (выступании из связки на 2/3L).

Изменения напряжений в зависимости от угла ориентации зерна во всех рассматриваемых случаях имеет одинаковый характер.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о том, что наименьшие напряжения на вершинах зёрен (рисунок 2.25) и по границе заделки в связку (рисунок 2.30) фиксируются при их тангенциальной ориентации относительно плоскости резания (Θ=0°). Однако данный вариант ориентации зёрен является наименее эффективным с точки зрения процесса резания, поскольку передние углы зёрен здесь достигают практически наименьших значений из возможных (рисунок 2.22, рисунок 2.26) и резание такими зёрнами происходит с меньшей производительностью и большими деформациями обраба-

тываемого материала (глава 6). Следует при этом отметить, что напряжения на вершинах зёрен определяют интенсивность их износа скалыванием, а напряжения по границе заделки в связку – износа в виде объёмного разрушения.

Более рациональным является ориентирование зёрен под углами, близкими к направлению вектора силы резания P, например, в рассматриваемом случае, Θ=67,5°. При данном варианте ориентации зёрен напряжения на их вершинах и по границе заделки в связку незначительно отличаются от случая их тангенциального расположения (Θ=0°), а передние углы характеризуются рациональными значениями близкими к нулевым. Таким образом, при углах ориентации, близких к направлению действия силы резания, зёрна в шлифовальных инструментах расположены эффективно срезают металл и испытывают напряжения, приближенные к минимально возможным.

Дальнейшие исследования по установлению рациональных углов ориентации шлифовальных зёрен с учётом разновидностей их формы ($K_ф$=1,6… $K_ф$=4,8) и глубины заделки в связку выявили аналогичный характер распределения напряжений (рисунки 2.31 – 2.33).

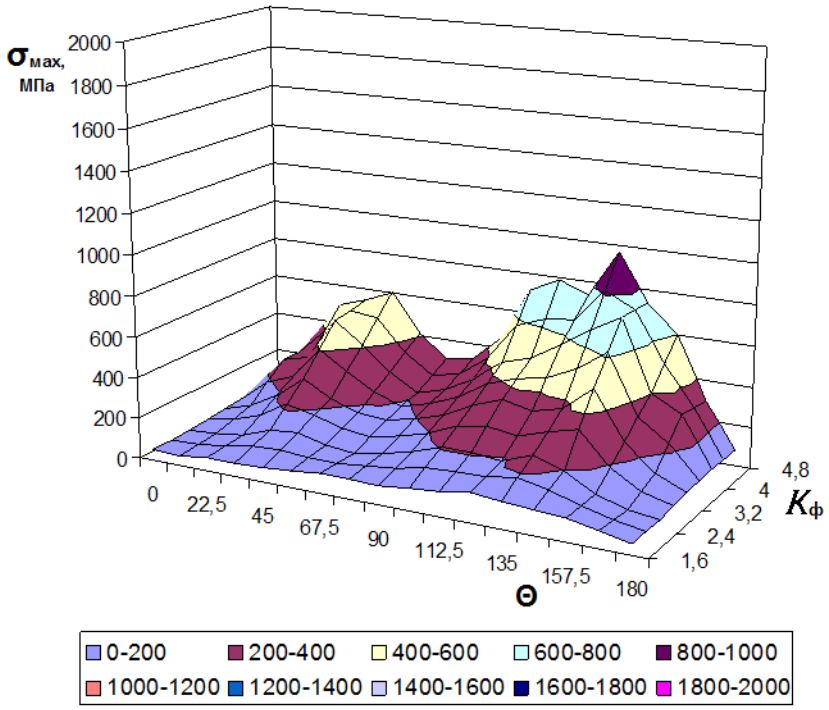


Рисунок 2.31 – Зависимость максимальных напряжений в моделях шлифовальных зёрен 13А 40Н (F46) по границе заделки в связку от угла ориентации (Θ) и коэффициента формы ($K_ф$) при закреплении в связке на 2/3L.

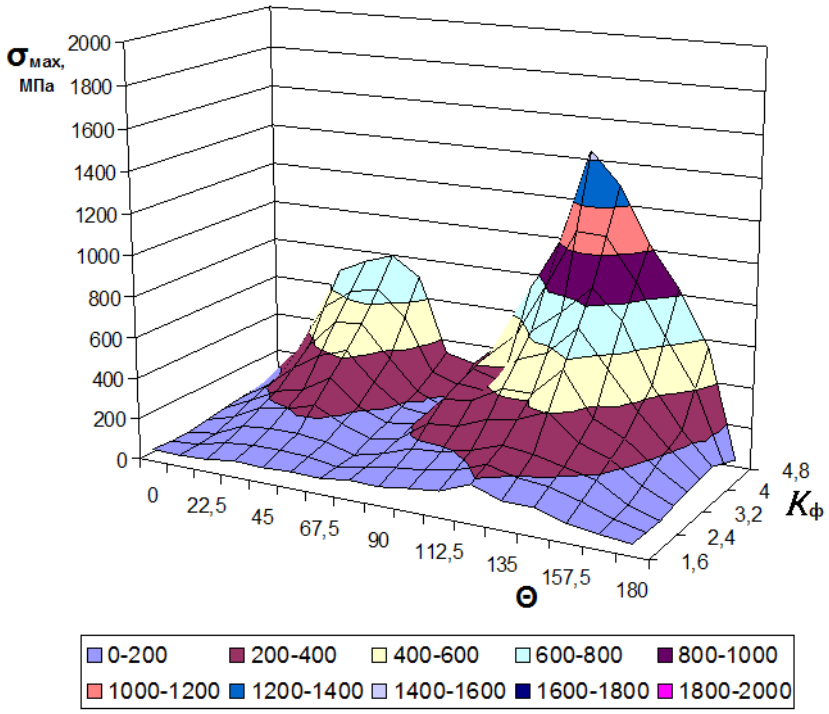


Рисунок 2.32 – Зависимость максимальных напряжений в моделях шлифовальных зёрен 13А 40Н (F46) по границе заделки в связку от угла ориентации (Θ) и коэффициента формы ($K_ф$) при закреплении в связке на 1/2L.

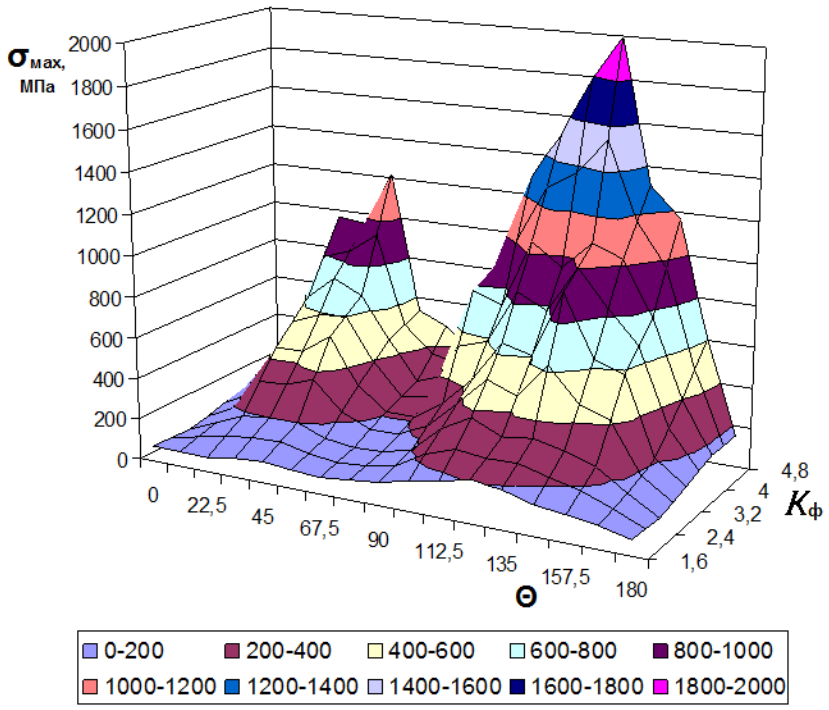


Рисунок 2.33 – Зависимость максимальных напряжений в моделях шлифовальных зёрен 13А 40Н (F46) по границе заделки в связку от угла ориентации (Θ) и коэффициента формы ($K_ф$) при закреплении в связке на 1/3L.

Полученные данные (рисунки 2.31 – 2.33) [103, 104, 123, 125] показывают, что для всех углов ориентации зёрен при увеличении их коэффициента формы максимальные напряжения существенно возрастают. Так, при наиболее рациональном угле ориентации зёрен порядка Θ=67,5° при переходе от $K_ф$=1,6 до $K_ф$=4,8 (заделка в связку до 1/2L) максимальные напряжения возрастают в 4,2 раза (с $\sigma_{мах}$=79,8 МПа до $\sigma_{мах}$=335,6 МПа). При наименее рациональном угле ориентации порядка Θ=124° при переходе от $K_ф$=1,6 до $K_ф$=4,8 максимальные напряжения возрастают в 7,7 раза (с $\sigma_{мах}$=187,7 МПа до $\sigma_{мах}$=1443,9 МПа). Выявленная зависимость коррелирует с результатами испытаний по оценке износа и коэффициента шлифования отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен (глава 5) и позволяет подтвердить их теоретически.

Кроме того, установлено, что с уменьшением глубины заделки зерна в связку максимальные напряжения в зёрнах также ощутимо увеличиваются. Так, для различных коэффициентов формы зёрен, при переходе от заделки в связке на 2/3L к заделке до 1/2L напряжения в зёрнах (для различных углов ориентации в среднем), возрастают в 1,03÷1,25 раза, а при переходе от заделки в связке на 1/2L к заделке на 1/3L рост составляет 1,24÷1,77 раза. При этом, влияние глубины заделки в связку увеличивается с ростом коэффициента формы зёрен.

При различных вариантах ориентации зёрен минимальная разница напряжений в зависимости от глубины заделки в связку фиксируется при наиболее рациональных углах их ориентации, а максимальная разница фиксируется при наименее рациональных углах ориентации. Так, при переходе от заделки в связке на 2/3L к заделке на 1/3L рост максимальных напряжений при Θ=67,5°÷79° (для различных коэффициентов формы зёрен в среднем) составляет 1,15÷1,31 раза, а для углов ориентации Θ=124°÷135° указанные отношения варьируются в диапазоне 1,91÷1,95 раза.

Анализ данных (рисунок 2.31 – 2.33) 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 π следующего вида:

Закрепление в связке до 1/2L:

$$\sigma_{max}=a_0/2 + a_1\cdot\cos(1\cdot2\cdot\Theta) + b_1\cdot\sin(1\cdot2\cdot\Theta) +\ldots+ a_8\cdot\cos(8\cdot2\cdot\Theta) + b_8\cdot\sin(8\cdot2\cdot\Theta) \quad (2.26)$$

где:

$$a_0 = 28{,}068\cdot K_ф^4 - 338{,}22\cdot K_ф^3 + 1546{,}6\cdot K_ф^2 - 2861{,}6\cdot K_ф + 2015{,}8$$

$$a_1 = -17{,}167\cdot K_ф^4 + 214{,}05\cdot K_ф^3 - 948{,}9\cdot K_ф^2 + 1748{,}3\cdot K_ф - 1153{,}1$$

$$b_1 = -4{,}4795\cdot K_ф^4 + 51{,}73\cdot K_ф^3 - 231{,}13\cdot K_ф^2 + 415{,}27\cdot K_ф - 290{,}27$$

$$a_2 = 14{,}452\cdot K_ф^4 - 181{,}84\cdot K_ф^3 + 781{,}26\cdot K_ф^2 - 1426{,}8\cdot K_ф + 911{,}61$$

$$b_2 = 8{,}415\cdot K_ф^4 - 103{,}38\cdot K_ф^3 + 461{,}56\cdot K_ф^2 - 854{,}93\cdot K_ф + 561{,}34$$

$$a_3 = 9{,}310\cdot K_ф^4 - 113{,}42\cdot K_ф^3 + 498{,}95\cdot K_ф^2 - 953{,}7\cdot K_ф + 654{,}8$$

$$b_3 = -8{,}448\cdot K_ф^4 + 99{,}488\cdot K_ф^3 - 416{,}59\cdot K_ф^2 + 727{,}53\cdot K_ф - 444{,}38$$

$$a_4 = 2{,}198\cdot K_ф^4 - 43{,}151\cdot K_ф^3 + 255{,}88\cdot K_ф^2 - 572{,}32\cdot K_ф + 422{,}63$$

$$b_4 = 0{,}981\cdot K_ф^4 - 16{,}685\cdot K_ф^3 + 89{,}487\cdot K_ф^2 - 184{,}76\cdot K_ф + 122{,}31$$

$$a_5 = -9{,}773\cdot K_ф^4 + 108{,}63\cdot K_ф^3 - 431{,}59\cdot K_ф^2 + 715{,}57\cdot K_ф - 422{,}42$$

$$b_5 = -7{,}510\cdot K_ф^4 + 94{,}015\cdot K_ф^3 - 420{,}99\cdot K_ф^2 + 790{,}59\cdot K_ф - 519{,}68$$

$$a_6 = -23{,}016\cdot K_ф^4 + 287{,}68\cdot K_ф^3 - 1283{,}2\cdot K_ф^2 + 2398{,}8\cdot K_ф - 1575{,}1$$

$$b_6 = 4{,}436\cdot K_ф^4 - 52{,}868\cdot K_ф^3 + 225{,}21\cdot K_ф^2 - 409{,}6\cdot K_ф + 267{,}81$$

$$a_7 = 6{,}326\cdot K_ф^4 - 68{,}187\cdot K_ф^3 + 254{,}2\cdot K_ф^2 - 396{,}48\cdot K_ф + 224{,}4$$

$$b_7 = 2{,}929\cdot K_ф^4 - 41{,}456\cdot K_ф^3 + 201{,}72\cdot K_ф^2 - 394{,}33\cdot K_ф + 260{,}47$$

$$a_8 = 1{,}756\cdot K_ф^4 - 30{,}774\cdot K_ф^3 + 168{,}36\cdot K_ф^2 - 348{,}77\cdot K_ф + 235{,}38$$

$$b_8 = 0{,}036\cdot K_ф^4 + 6{,}474\cdot K_ф^3 - 52{,}729\cdot K_ф^2 + 131{,}36\cdot K_ф - 97{,}337$$

Таким образом, в процессе исследований выявлены двухфакторные зависимости максимальных напряжений в шлифовальных зёрнах от угла ориентации и коэффициента формы (рисунок 2.31 – 2.33) и зависимости передних углов зёрен от угла ориентации и коэффициента формы (рисунок 2.22).

Совместный анализ результатов оценки передних углов и напряжений в ориентированных шлифовальных зёрнах с контролируемой формой позволил установить, что:

– для достижения максимальных передних углов у зёрен и, соответственно, максимальной режущей способности шлифовальных инструментов необходимо применять игольчато-пластинчатые зёрна (с наибольшими $K_ф$) и распола-

гать их в инструментах под углами ориентации Θ=22,5°÷90° (в особенности Θ=22,5°÷45°);

– для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов, при прочих равных условиях, целесообразно использовать зёрна изометрической формы (с минимальными $K_ф$), а также ориентировать зёрна в тангенциальном направлении (Θ=0°)

– 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 [182, 187, 197, 258], то рациональные углы ориентации зёрен соосно силе резания находятся в диапазоне Θ=50÷84°;

– 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 Θ=65°÷75°, что коррелирует с результатами исследований по поиску рациональных углов ориентации зёрен в инструментах с их однорядным расположением [16].

Изложенные выводы подтверждаются результатами оценки объёмнонапряжённого состояния зёрен по нескольким критериям прочности. Так, программный комплекс «SolidWorks» позволяет производить прочностные расчёты по критерию максимальных нормальных напряжений и критерию Мора-Кулона, которые используются для хрупких материалов, а также по критерию Мизеса, и критерию Треска, которые применяются для пластичных материалов. При этом, программный комплекс работает таким образом, что для нагруженного объекта из любого материала (хрупкого, либо пластичного) всегда рассчитываются напряжения по Мизесу, а также эквивалентные деформации. Расчёты

по другим критериям прочности осуществляются в виде дополнительной опции, при необходимости.

Результатов анализа объёмно-напряжённого состояния зёрен по критерию максимального нормального напряжения, критерию Мора-Кулона, критерию Мизеса, а также по эквивалентным деформациям выявили одинаковую для всех случаев качественную картину, подробно описанную ранее. При этом, наиболее близки по процентному соотношению между напряжениями (или деформациями) для конкретных углов ориентации зёрен результаты расчётов по критерию максимального нормального напряжения, эквивалентным деформациям и критерию Мизеса. Результаты анализа по критерию Мора-Кулона дают аналогичную качественную картину распределения напряжений, при этом, соотношение между их абсолютными величинами для конкретных углов ориентации существенно меньше, чем при других сравниваемых критериях прочности.

Характер полученной качественной картины объёмно-напряжённого состояния зёрен обусловлен тем, что в наиболее нагруженных зонах зёрен главное нормальное напряжения σ_1 находится в области положительных значений, σ_2 может быть положительным или отрицательным (т.е. растягивающим или сжимающим), а σ_3 находится в зоне отрицательных значений (т.е. является сжимающим) и многократно превосходит (по модулю) величины σ_1 и σ_2. Таким образом, сжимающие напряжения σ_3 во многом и предопределяют качественную картину для всех сравниваемых критериев прочности.

Следует также отметить, что на сегодняшний день разработано множество критериев прочности для тех или иных материалов и условий их нагружения. Целая плеяда известных учёных работала и работает в этом направлении. Их имена и достижения отражены в объёмных научных трудах и в соответствующих критериях прочности. Огромная роль здесь принадлежит отечественной научной школе, в т.ч. – представителям Российской академии наук. Анализ диссертационных работ по научной специальности «Механика деформируемого твёрдого тела» показывает, что разрабатываются новые критерии прочности, позволяющие более точно рассчитывать напряжения для конкрет-

ных специфических условий. Методология исследований здесь состоит в следующем – результаты теоретических расчётов сравниваются с результатами экспериментов (результатами прочностных испытаний) и оценивается насколько близко тот или иной критерий прочности позволяет качественно и количественно спрогнозировать результаты практических испытаний.

Выбор же критериев прочности для оценки напряжённого состояния зёрен при шлифовании обуславливается следующими соображениями. Все зёрна, участвующие в работе, так или иначе, разрушаются (изнашиваются). Разница между ними заключается только в виде и скорости разрушения. Соответственно, нет смысла в получении особо точных данных о величинах напряжений (которые в общем случае позволяют определять коэффициент запаса прочности объекта). Вполне достаточно качественно оценить картину распределения напряжений в зёрнах при тех или иных коэффициентах формы и углах их ориентации относительно плоскости резания. В то же время, проведённые прочностные испытания зёрен различных марок и зернистостей с учётом факторов их формы и ориентации (п. 2.7) коррелируют и подтверждают выявленную картину распределения напряжений в зёрнах. Вследствие этого, для анализа объёмно-напряжённого состояния зёрен вполне оправдано использование давно известных общепринятых критериев прочности.

Таким образом, представленный алгоритм и методология исследований, а также совместный анализ получаемых зависимостей позволяют проектировать шлифовальные инструменты с рациональной геометрией зёрен для конкретных условий обработки и параметров силового нагружения.

2.7 Влияние формы и ориентации зёрен на их прочность

Для практической проверки разработанной методики и результатов оценки напряжений в шлифовальных зёрнах был проведён цикл дополнительных исследований по установлению пределов прочности зёрен различных марок и зернистостей, с различными коэффициентами формы и заданным направлением

ориентации путём их разрушения одноосным сжатием на специальной установке, где моделировалось воздействие на зёрна радиальной составляющей силы резания P_y.

К стандартным методам определения прочности шлифовальных зёрен относятся оценка их разрушаемости (по ГОСТ 28924–91 [61]) и установление прочности единичных зёрен (по ТУ2-036-105–85).

Разрушаемость зёрен оценивают путём их измельчения в лабораторной шаровой мельнице типа ПХЗ при определенном режиме испытаний с последующим ситовым рассевом и анализом продуктов измельчения по количеству зерен (в %), прошедших через контрольные сита [230]. За рубежом также пользуются этим методом. В США для этой цели применяют стандарт ANSI B74.8.

Определение прочности единичных зёрен осуществляют путём их поштучного одноосного сжатия и разрушения между двумя стальными (или твердосплавными) пластинками при равномерно возрастающей нагрузке. Для этой цели используют прибор ППЗ-1М, который имеет циферблатные весы, снабженные нагружающим устройством в виде штока, перемещаемого в вертикальном направлении с постоянной скоростью, и реверсивным электродвигателем. Испытуемые шлифовальные зёрна (5–10 штук) кладутся на стальную пластину и иглой распределяются так, чтобы расстояние между ними было не менее 2 мм. Затем, перемещая пластину по предметному столику, подводят какое-либо из зёрен под шток и включают электродвигатель. Шток со стальным или твердосплавным наконечником опускается вниз, соприкасается с зерном, давит на него и разрушает. Момент разрушения фиксируется путём визуального наблюдения за испытуемым зерном в микроскоп. Испытание считается законченным, когда неразрушенная часть зерна составляет менее половины его первоначального размера. После этого шток отводят в исходное положение, под него подводят другое зерно и испытание повторяют. Показателем прочности служит средняя величина усилия разрушения 50 отдельных зёрен.

Метод разрушения зёрен одноосным сжатием распространен и за рубежом. Здесь он, как правило, используется в модифицированном варианте, когда

в целях ускорения процедуры испытаний зёрна разрушаются в устройстве типа валковой дробилки [311], где с помощью вибропитателя они поштучно подаются в зазор между стальными вращающимися валками. Зёрна дробятся, а усилие, возникающее при этом и раздвигающее валки, фиксируется с помощью тензодатчиков, наклеенных на опору одного из валков и подключенных к осциллографу. Расшифровывая осциллограмму, получают значения усилий разрушения, служащие показателем прочности данных зёрен. Недостатком такого устройства для оценки прочности является неточность получаемых результатов, которая обусловлена отсутствием надежного критерия констатации факта разрушения зёрен. А именно, многие зёрна проскальзывают между валками, раздвигая их, но не разрушаясь.

Из других методов измерения прочности зёрен известен способ резания единичным зерном клиновидного образца обрабатываемого материала по схеме плоского шлифования [224], в котором прочность зерна оценивается по предельной толщине стружки в момент его разрушения. Прочность зерен оценивают также на основе испытаний ударом специального бойка, качающимся или падающим с разной высоты грузом [90, 101, 183, 212]. В некоторых случаях прочность абразивных материалов оценивают по зоне повреждаемости, образуемой в результате укола исследуемого зерна алмазной пирамидой [28].

Анализ перечисленных методов оценки прочности зёрен показывает, что они имеют свои преимущества и недостатки. Критерием правильности выбора того или иного метода следует считать его максимальное соответствие реальным условиям нагружения зёрен при их последующей эксплуатации.

Особенность условий работы единичных шлифовальных зёрен в процессе резания состоит в том, что они находятся под действием сжимающей (P_y) и изгибающей (P_z) нагрузок, которые главным образом и определяют их напряженное состояние. Причём, радиальная составляющая силы резания, как правило, значительно (в 1,5÷10 раз) превосходит тангенциальную. Поэтому в большинстве методов оценки прочности шлифовальных зёрен реализуется схема одноосного сжатия, например, сдавливание навески зёрен в прессформе, разрушение

зёрен в валковой дробилке и др.

Подобная схема нагружения может быть эффективно реализована при методе одноосного сжатия единичных зёрен. Здесь на испытуемое зерно действует сжимающая сила, аналогичная нормальной составляющей силы резания. Поскольку тангенциальная сила мала, то ей можно пренебречь, а её отсутствие в данном случае компенсируется рядом других преимуществ метода. В их числе: отсутствие необходимости изготавливать модели зёрен со специальной формой и размерами (как для методов использования клиновидного образца и удара зерна грузом); возможность проведения многократных испытаний, что важно для получения достоверных данных для тел, которым свойственно хрупкое разрушение и имеющим большой разброс опытных данных; достаточно простая и технически легко реализуемая схема испытаний, пригодная для зёрен широкого круга марок и зернистостей, применяемых на практике для изготовления шлифовальных инструментов различного класса и назначения.

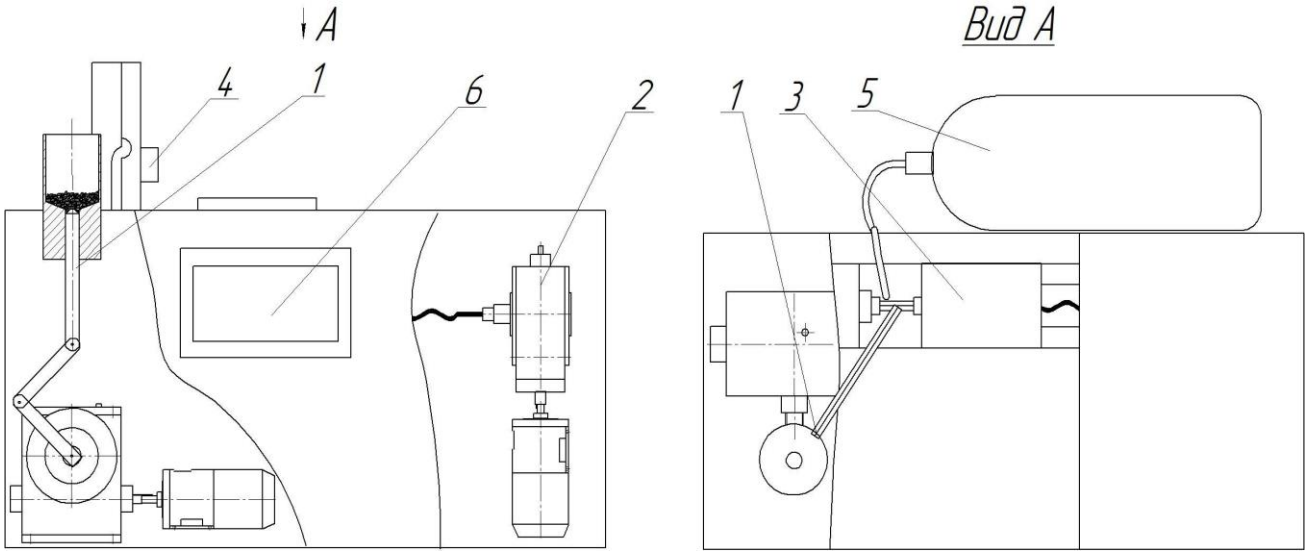
Таким образом, с учётом всех факторов, для оценки прочности зёрен предпочтительней выглядит метод одноосного сжатия. Но и у этого метода есть ряд недостатков, таких как: отсутствие точного критерия момента разрушения зёрен, отсутствие определенной ориентации зёрен при испытании, трудоёмкость проведения большого числа испытаний.

Для преодоления этих недостатков разработана конструкция автоматической установки, являющаяся дальнейшим развитием испытательного оборудования подобного назначения [1, 98, 100, 101]. Внешний вид и схема установки отражены на рисунке 2.34 [121].

Конструкция установки состоит из следующих основных элементов: *1* – питатель, обеспечивающий поштучную подачу зёрен; *2* – редуктор с электродвигателем, вращающим ходовой винт; *3* – подвижная пластина, совершающая с помощью механизма «винт-гайка» продольное перемещение; *4* – датчик шума, фиксирующий момент разрушения зёрен; *5* – баллон со сжатым воздухом для удаления осколков разрушенных зёрен; *6* – цифровой индикатор для фиксации нагрузки разрушения.



а)



б)

Рисунок 2.34 – Внешний вид (*а*) и схема (*б*) установки для оценки прочности шлифовальных зёрен с разной формой и ориентацией в пространстве

В автоматическом режиме установка работает следующим образом. При нажатии кнопки «Пуск» включается электродвигатель питателя, который через редуктор и кривошипный механизм заставляет шток питателя подниматься снизу вверх через массу испытуемых шлифовальных зёрен. Шток имеет съём-

ный наконечник в виде усеченного конуса, размер площадки которого равен среднему номинальному диаметру испытуемых зёрен. Благодаря этому при проходе штока через массу свободного абразива на площадке наконечника остается только одно зерно, которое по трубопроводу скатывается на рабочий стол установки, попадая в пространство между подвижной и неподвижной пластинами. В верхнем положении штока (когда скатывается зерно) срабатывает конечный выключатель, который запитывает электродвигатель, вращающий через редуктор ходовой винт и перемещающий подвижную пластину. Шлифовальное зерно, находящееся на рабочем столе, начинает сжиматься между пластинами и, при достижении предельной нагрузки, разрушается. Усилие разрушения измеряется тензодатчиками, встроенным в неподвижную пластину, и считывается визуально с цифрового индикатора либо может записываться самописцем или фиксироваться в памяти компьютера. Характерный треск, раздающийся в момент разрушения зерна, фиксируется датчиком шума, который подает сигнал на реверсирование электродвигателя. Подвижная пластина начинает отходить назад и при возврате в исходное положение она заставляет срабатывать два конечных выключателя. Один из них вновь включает электродвигатель питателя (выключенный штоком питателя, вернувшимся в нижнее положение), благодаря чему цикл испытаний повторяется со следующим зерном.

Второй выключатель подает питание на электромагнитный клапан баллона со сжатым воздухом, в результате чего воздух под давлением поступает по трубопроводу в зону между пластинами и сдувает со стола остатки разрушенного шлифовального зерна.

В автоматическом режиме установка обеспечивает возможность проведения испытаний в условиях, моделирующих радиальное либо тангенциальное расположение зёрен на рабочей поверхности шлифовального круга. При радиальной ориентации испытуемого зерна его наибольшая ось совпадает с вектором действия усилия сжатия (перпендикулярна теоретической плоскости резания), а при тангенциальной – перпендикулярна данному вектору (параллельна теоретической ПР). Радиальное (рисунок 2.35) расположение зерна *2* на уста-

новке достигается за счёт наличия продольного паза треугольной формы, выполненного в столе *5*. Шлифовальное зерно, попадая из питателя в этот паз, под действием силы тяжести занимает в нём положение, при котором его наибольшая ось становится параллельной вектору усилия сжатия.

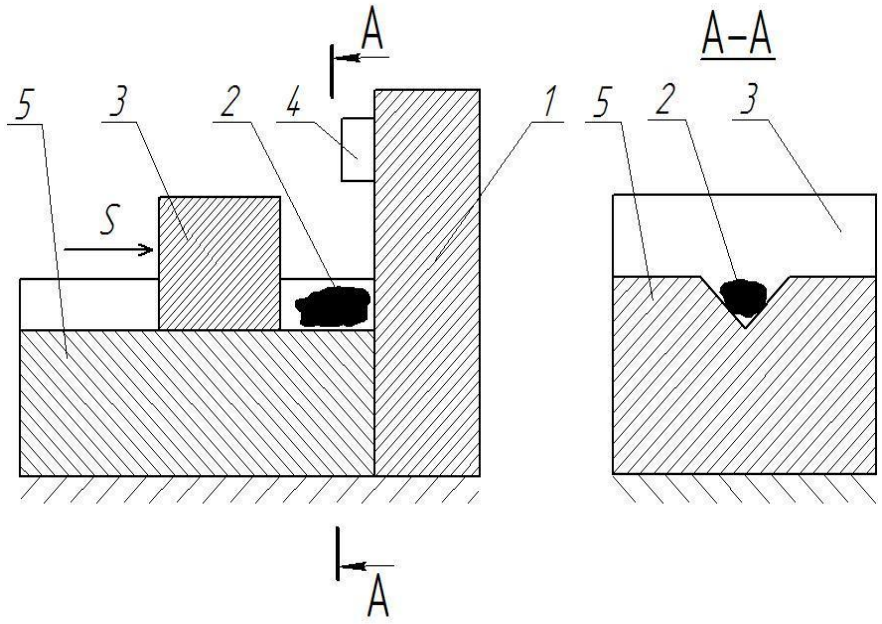


Рисунок 2.35 – Схема радиальной ориентации испытуемых шлифовальных зёрен на установке для оценки их прочности

В подвижной пластине *3*, которой осуществляется сжатие и разрушение зерна, имеется выступ, соответствующий по форме пазу в столе *5*. Момент разрушения устанавливается с помощью датчика шума *4*, а усилие разрушения – за счёт тензодатчиков, встроенных в балку неподвижной пластины *1*. Тангенциальная ориентация зёрен на установке обеспечивается посредством поворота стола на 90°, так чтобы поверхность неподвижной пластины *1* располагалась горизонтально. В этом случае зёрна из питателя попадают на плоскость неподвижной пластины и под действием силы тяжести занимают на ней наиболее устойчивое положение – т.е. располагаются большей осью перпендикулярно вектору усилия сжатия.

Кроме того, в ручном режиме установка обеспечивает возможность проведения испытаний зёрен при любых других углах их ориентации. Это достига-

ется путём установки на неподвижную пластину *1* (рисунок 2.35) тонкой металлической пластинки прямоугольной формы с предварительно накернёнными углублениями и вклеенными в них под требуемым углом ориентации шлифовальными зёрнами (рисунок 2.36). После раздавливания одного зерна пластинка с зёрнами вручную перемещается таким образом, чтобы следующее зерно оказалось под сжимающим наконечником (подвижной пластиной *3*, рисунок 2.36).

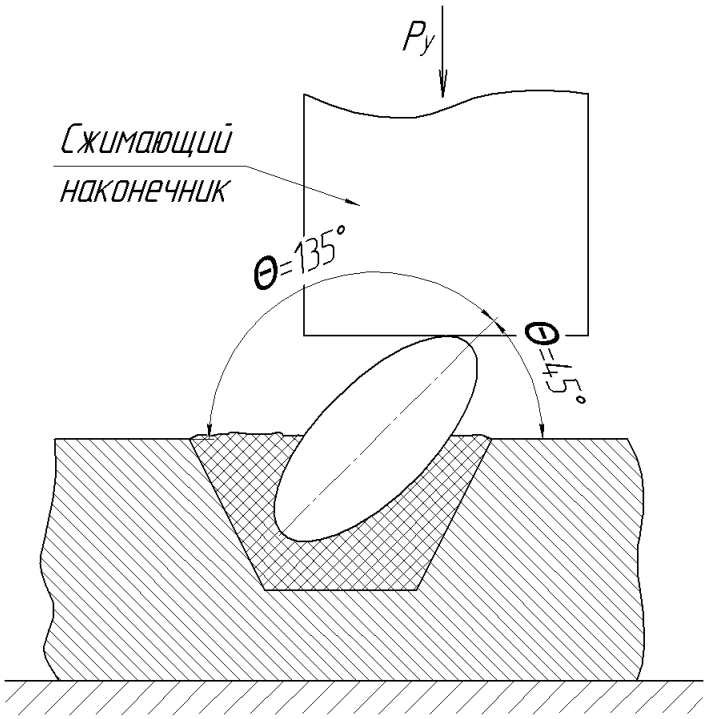


Рисунок 2.36 – Схема испытания ориентированных шлифовальных зёрен на установке для оценки их прочности

Конструкция данной установки выиграла Всероссийский конкурс Министерства образования и науки Российской Федерации (2006 г.) в номинации «Машиностроение, станкостроение и безотходная технология» и отмечена медалью «За лучшую научную работу» (приказ Рособразования № 1356 от 27.07.2007 г.).

На описанной установке проведён цикл прочностных испытаний шлифовальных зёрен различной формы и с разной ориентацией в пространстве [109, 121]. В частности, испытанию подвергались зёрна нормального электрокорунда зернистостью № 63 (13А 63Н (F30)) из фракций абразива, упорядоченных по форме на вибросепараторе (рисунок 2.37).

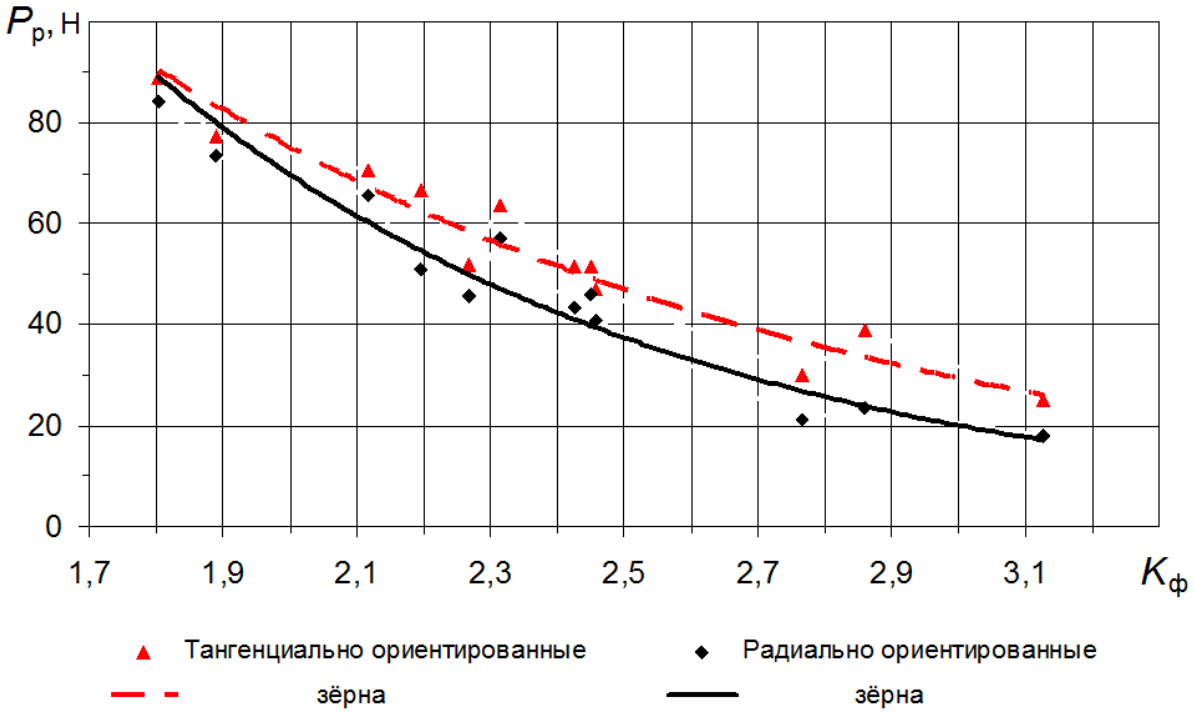


Рисунок 2.37 – Усилие разрушения ($P_р$) шлифовальных зёрен 13А 63Н (F30) из 12-ти фракций с разной формой и при двух направлениях ориентации

Данные зёрна были разделены по форме на вибрационном сепараторе на 12 фракций, для каждой из которых на основе измерений 50-ти зёрен были определены средние объёмные коэффициенты формы (см. п. 2.2). Зёрна из указанных фракций были испытаны на прочность при радиальном (Θ=90°) и тангенциальном (Θ=0°) направлениях ориентации (по 50 штук из каждой фракции при заданном угле ориентации) на описанный выше установке при автоматическом режиме её работы. В результате были определены средние усилия разрушения для всех рассматриваемых фракций и случаев ориентации.

Совместный анализ результатов по установлению влияния формы и ориентации зёрен на их прочность позволил построить обобщенные зависимости, выражаемые следующими экспоненциальными моделями:

Θ=0°: $P_р = 495{,}88 \cdot e^{-0{,}944 \cdot K_ф}$; R^2=0,93 (2.27)

Θ=90°: $P_р = 841{,}21 \cdot e^{-1{,}245 \cdot K_ф}$; R^2=0,94 (2.28)

Из анализа полученных данных (рисунок 2.37) следуют несколько выводов: 1) прочность зёрен зависит как от их формы, так и от пространственной

ориентации в теле шлифовального инструмента; 2) независимо от направления ориентации, с увеличением коэффициента формы зёрен усилие их разрушения уменьшается, т.е. при прочих равных условиях, изометрические зёрна более прочны, чем игольчато-пластинчатые зёрна; 3) прочность изометрических зёрен ($K_ф$=1,81) в 3,5÷5,2 раза выше, чем аналогичный показатель у игольчато-пластинчатых зёрен ($K_ф$=3,13); 4) разница в прочности различно ориентированных зёрен тем более заметна, чем больший коэффициент формы они имеют, причём при одинаковых средних коэффициентах формы прочность тангенциально ориентированных зёрен всегда выше по сравнению с радиально ориентированными зёрнами: при коэффициентах формы $K_ф$=1,8÷1,9 эта разница достаточно мала и составляет 1,6÷4,5 %, в то же время, при коэффициентах формы $K_ф$=3,0÷3,1 разница в прочности радиально и тангенциально ориентированных зёрен достигает 46÷51%.

Дополнительно проведены исследования по установлению пределов прочности шлифовальных зёрен двух марок и четырёх зернистостей – нормальных электрокорундов 13А 200Н (F10), 13А 100Н (F20), 13А 63Н (F30) и карбида кремния чёрного 53С 80Н (F24), ориентированных под следующими углами: Θ=0°, Θ=22°30′(157°30′), Θ=45°(135°), Θ=67°30′(112°30′), Θ=90°. Испытания проводились при ручном режиме работы установки по оценке прочности шлифовальных зёрен.

При подготовке к проведению испытаний для каждого фиксированного угла ориентации зёрен в исследуемой фракции подготавливалось по 50 зёрен. Перед вклейкой на пластинки у каждого шлифовального зерна определялся коэффициент формы, зерну присваивался порядковый номер, согласно которому оно подвергалось испытанию. Таким образом, цикл испытаний для одной фракции абразива состоял в разрушении 250 ориентированных зёрен с предварительно установленными коэффициентами формы. Это позволило получить зависимости усилия разрушения зёрен от коэффициента их формы для различных углов ориентации.

Точность ориентирования зёрен обеспечивалась тем, что пластинки с подготовленными углублениями при помощи универсального угломера устанавливались и фиксировались под требуемым углом относительно горизонтальной плоскости. В углубления наносился клеевой состав (эпоксидная смола, смешанная с отвердителем), после загустения которого (через 15÷20 мин) зёрна поштучно вклеивались пинцетом. Главная ось шлифовальных зёрен располагалась вертикально, а глубина их заделки составляла 1/2L (рисунок 2.38). Далее производилось отверждение клеевого состава при естественных условиях в течение 24 часов. На каждой пластинке (длинной порядка 100 мм) размещалось по 10 зёрен.

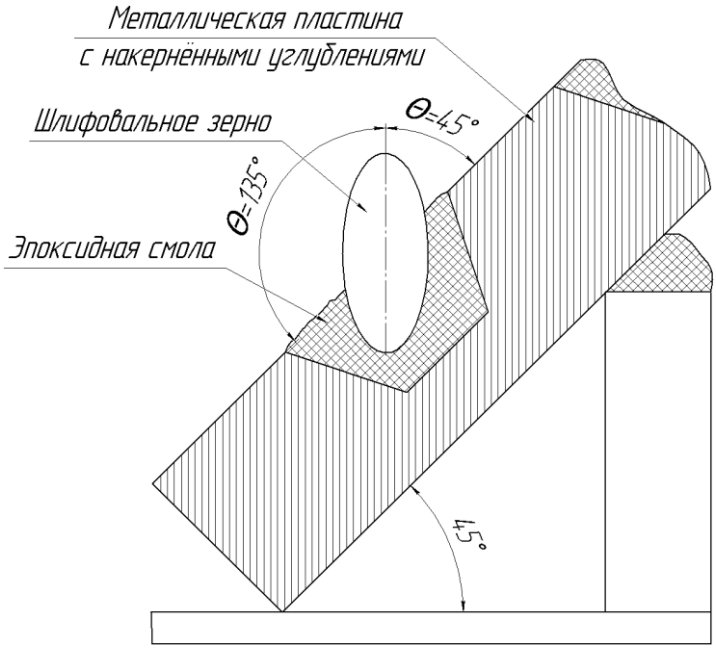


Рисунок 2.38 – Схема ориентирования шлифовальных зёрен при подготовке к испытаниям

После проведения испытаний полученные данные заносились в таблицы Excel, на основе которых строились точечные диаграммы, выводились математические зависимости усилия разрушения зёрен от коэффициента формы (линейные, логарифмические, степенные и экспоненциальные) и сравнивались по величине коэффициентов корреляции. Установлено, что полученные результаты наиболее достоверно выражаются экспоненциальными моделями (2.29) – (2.49), которые представлены в виде графиков на рисунках 2.39 – 2.42 [109].

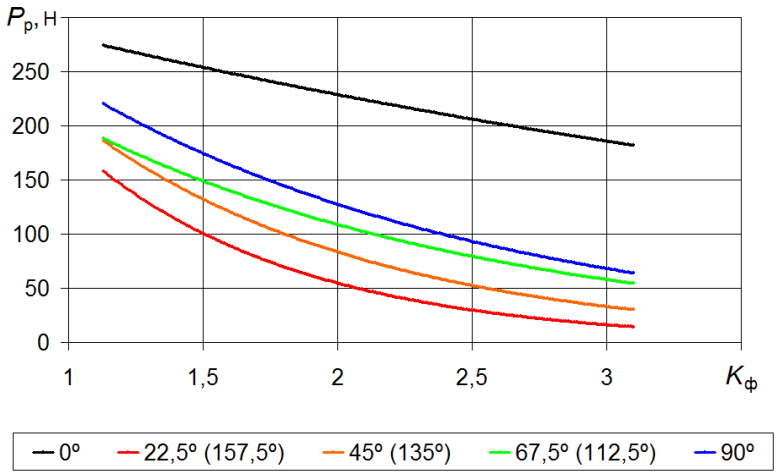


Рисунок 2.39 – Зависимости усилия разрушения ($P_р$) шлифовальных зёрен 13А 200Н (F10) от коэффициента формы ($K_ф$) при различных углах ориентации (Θ).

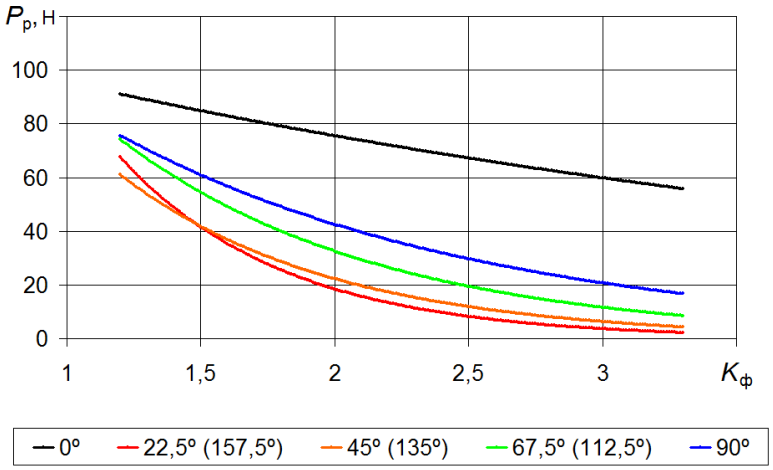


Рисунок 2.40 – Зависимости усилия разрушения ($P_р$) шлифовальных зёрен 13А 100Н (F20) от коэффициента формы ($K_ф$) при различных углах ориентации (Θ).

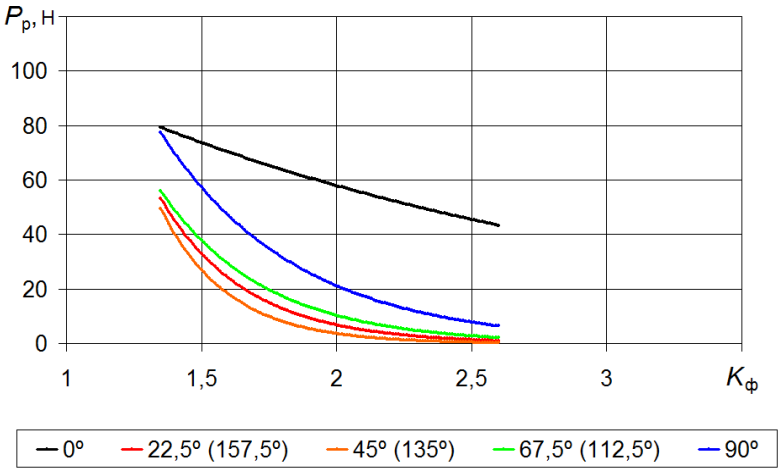


Рисунок 2.41 – Зависимости усилия разрушения ($P_р$) шлифовальных зёрен 13А 63Н (F30) от коэффициента формы ($K_ф$) при различных углах ориентации (Θ).

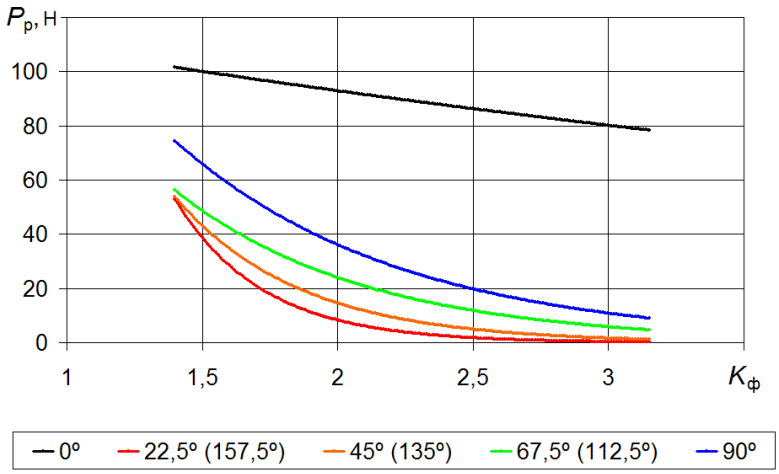


Рисунок 2.42 – Зависимости усилия разрушения ($P_р$) шлифовальных зёрен 53С 80Н (F24) от коэффициента формы ($K_ф$) при различных углах ориентации (Θ).

Усилия разрушения зёрен нормального электрокорунда 13А 200Н (F10):

Θ=0°: $P_р = 347{,}03 \cdot e^{-0{,}209 \cdot Kф}$; R^2=0,63 (2.29)

Θ=22°30′(157°30′): $P_р = 626{,}27 \cdot e^{-1{,}220 \cdot Kф}$; R^2=0,79 (2.30)

Θ=45° (135°): $P_р = 528{,}82 \cdot e^{-0{,}925 \cdot Kф}$; R^2=0,70 (2.31)

Θ=67°30′(112°30′): $P_р = 382{,}84 \cdot e^{-0{,}630 \cdot Kф}$; R^2=0,67 (2.32)

Θ=90°: $P_р = 447{,}19 \cdot e^{-0{,}628 \cdot Kф}$; R^2=0,70 (2.33)

Усилия разрушения зёрен нормального электрокорунда 13А 100Н (F20):

Θ=0°: $P_р = 120{,}28 \cdot e^{-0{,}233 \cdot Kф}$; R^2=0,58 (2.34)

Θ=22°30′(157°30′): $P_р = 471{,}75 \cdot e^{-1{,}620 \cdot Kф}$; R^2=0,77 (2.35)

Θ=45°(135°): $P_р = 275{,}76 \cdot e^{-1{,}258 \cdot Kф}$; R^2=0,71 (2.36)

Θ=67°30′(112°30′): $P_р = 254{,}91 \cdot e^{-1{,}029 \cdot Kф}$; R^2=0,69 (2.37)

Θ=90°: $P_р = 179 \cdot e^{-0{,}719 \cdot Kф}$; R^2=0,55 (2.38)

Усилия разрушения зёрен нормального электрокорунда 13А 63Н (F30):

Θ=0°: $P_р = 151{,}89 \cdot e^{-0{,}482 \cdot Kф}$; R^2=0,64 (2.39)

Θ=22°30′(157°30′): $P_р = 3814{,}5 \cdot e^{-3{,}166 \cdot Kф}$; R^2=0,75 (2.40)

Θ=45°(135°): $P_р = 11310 \cdot e^{-4{,}024 \cdot Kф}$; R^2=0,76 (2.41)

Θ=67°30′(112°30′): $P_р = 1896{,}6 \cdot e^{-2{,}610 \cdot Kф}$; R^2=0,72 (2.42)

Θ=90°: $P_р = 1142{,}6 \cdot e^{-1{,}995 \cdot Kф}$; R^2=0,51 (2.43)

Усилия разрушения зёрен карбида кремния чёрного марки 53С 80Н (F24):

Θ=0°: $P_р = 124{,}84 \cdot^{-0{,}148 \cdot Кф}$; R^2=0,67 (2.44)

Θ=22°30′(157°30′): $P_р = 3963{,}5 \cdot e^{-3{,}085 \cdot Кф}$; R^2=0,86 (2.45)

Θ=45°(135°): $P_р = 1122{,}7 \cdot e^{-2{,}172 \cdot Кф}$; R^2=0,80 (2.46)

Θ=67°30′(112°30′): $P_р = 407{,}25 \cdot e^{-1{,}416 \cdot Кф}$; R^2=0,75 (2.47)

Θ=90°: $P_р = 400{,}7 \cdot e^{-1{,}203 \cdot Кф}$; R^2=0,76 (2.48)

Из анализа полученных данных следует, что:

– для абразивов одинакового химического состава с уменьшением номера зернистости снижаются усилия разрушения зёрен при всех углах ориентации;

– зёрна карбида кремния чёрного несколько прочнее зёрен нормального электрокорунда аналогичной зернистости;

– усилия разрушения зёрен и их прочность зависят как от фактора формы, так и от фактора пространственной ориентации;

– независимо от направления ориентации, с увеличением коэффициента формы зёрен усилие их разрушения уменьшается, т.е. при прочих равных условиях, изометрические зёрна более прочны, чем игольчато-пластинчатые зёрна;

– наиболее рациональным с точки зрения прочности зёрен при одноосном сжатии является вариант их тангенциальной ориентации (Θ=0°), далее по убыванию следует случай их радиальной ориентации (Θ=90°), когда главные оси зёрен совпадают с вектором воздействующей сжимающей нагрузки, затем Θ=67,5° (112,5°) и наименее рациональными являются углы ориентации Θ=45°÷22,5° (135°÷157,5°);

– разница в прочности различно ориентированных зёрен тем более заметна, чем больший коэффициент формы они имеют.

Для адекватного сопоставления результатов оценки напряжённого состояния зёрен при работе в шлифовальных кругах (п. 2.5, рисунки 2.31 – 2.33) с результатами прочностных испытаний шлифовальных зёрен методом одноосного сжатия (рисунки 2.39 – 2.42), ввиду различий в схемах нагружения зёрен, проведён дополнительный анализ напряжений, возникающих в шлифовальных зёрнах под воздействием силы резания, т.е. совместного воздействия её состав-

ляющих P_y и P_z) и отдельного воздействия сжимающей силы P_y (рисунок 2.43).

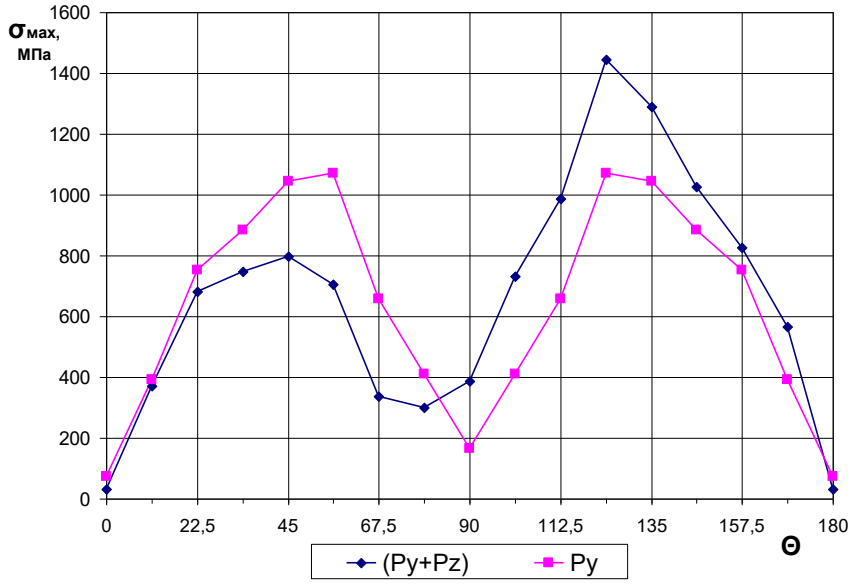


Рисунок 2.43 – Максимальные напряжения в модели шлифовального зерна 13А 40Н (F46) с $K_ф$=4,8 по границе заделки в связку при различных углах ориентации, закреплении в связке до 1/2L, под действием силы резания (векторная сумма $P_y + P_z$) и отдельно P_y

Анализ полученных данных (рисунок 2.44) показывает, что график распределения максимальных напряжений в шлифовальных зёрнах при различных углах ориентации от действия сжимающей силы P_y соответствует результатам испытаний на прочность ориентированных шлифовальных зёрен методом одноосного сжатия (рисунки 2.39 – 2.42). Наименьшие напряжения в зёрнах возникают при их тангенциальной ориентации (Θ=0°) и, соответственно, для разрушения зёрен при данном варианте ориентации требуются наибольшие усилия. Далее, по возрастанию напряжений, следует случай радиальной ориентации зёрен (Θ=90°), а наибольшие напряжения в зёрнах фиксируются при углах ориентации Θ=45°(135°) и Θ=22,5° (157,5°), что коррелирует с результатами прочностных испытаний зёрен.

Помимо этого, анализ данных (рисунок 2.43) показывает, что наличие P_z в сравнении со случаем одноосного сжатия зёрен приводит к тому, что наименьшие максимальные напряжения в зёрнах (после варианта их тангенци-

альной ориентации) фиксируются при углах ориентации, практически совпадающих или близких к направлению вектора силы резания P (в данном случае Θ=67,5°÷79°). Кроме того, воздействие P_z в диапазоне углов ориентации Θ=0°÷90° приводит к более равномерному распределению напряжений в теле зёрен и снижению их максимальных величин, а в диапазоне углов ориентации Θ=90°÷180° воздействие P_z приводит к концентрации напряжений под консолью выступающей части зёрен и росту их максимальных значений. При этом, очевидно, что с уменьшением соотношения величин P_y и P_z выявленные отличия картины напряжений от варианта одноосного сжатия будут возрастать.

Соответственно, для каждого случая шлифования следует находить рациональные углы ориентации зёрен с учётом всех особенностей их нагружения в инструменте.

Дополнительным подтверждением пригодности разработанной методики анализа напряжённого состояния ориентированных зёрен для проектирования шлифовальных инструментов с рациональной геометрией режущих микроклиньев служат результаты оценки эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов, изготовленных из зёрен, которые в процессе изготовления кругов целенаправленно ориентировали электростатическим полем в определённом направлении (см. главу 3 и главу 6).

Таким образом, на практике доказано, что предложенная методика по анализу напряжений в шлифовальных зёрнах с учётом факторов их формы и ориентации пригодна для проектирования шлифовальных инструментов с рациональной геометрией зёрен под конкретные условия обработки и параметры силового нагружения.

2.8 Износ зёрен с разной формой и ориентацией

По общепринятой классификации износ единичных шлифовальных зёрен подразделяется на следующие разновидности: износ истиранием (когда происходит постепенное истирание и выглаживание задней поверхности зерна с об-

разованием площадки износа); износ скалыванием (когда в результате динамических нагрузок от зерна откалываются небольшие осколки); объёмное разрушение зерна (при больших действующих нагрузках или малой прочности зерно раскалывается на несколько крупных частей и вылетает из связки); вырыв зерна из связки (при слабой адгезии зерна со связкой или неудачном расположении на рабочей поверхности инструмента оно под действием сил резания целиком вырывается из тела инструмента) [169, 178, 180, 187, 191].

При шлифовании, когда осуществляется групповое микрорезание одновременно большим числом зёрен, имеющих произвольную форму и расположение в инструменте, одновременно могут иметь место все перечисленные виды износа. Эффективность обработки и стойкость инструмента зависит от баланса видов износа. Например, если зёрна изнашиваются преимущественно истиранием и скалыванием, то инструмент работает в благоприятных условиях и стойкость его будет велика. Если же большинство зёрен раскрашиваются и вылетают из связки, то инструмент работает с интенсивным износом и будет иметь невысокую стойкость. При изменении условий работы зёрен (режимов резания, физико-механических свойств обрабатываемого материала, применения СОЖ и пр.) возможен переход от одной стадии износа к другой: например, от износа по площадке к износу путём скалывания или к износу за счёт объёмного разрушения и наоборот.

Установление закономерностей механизма износа зёрен даёт возможность повысить эффективность работы инструмента в целом. Однако, непосредственное исследование износа отдельных зёрен, находящихся на рабочей поверхности инструмента, на основе методов, используемых для лезвийных инструментов, реализовать технически трудно. Причина в том, что зёрна являются весьма мелкими объектами, размеры передних и задних поверхностей которых составляют десятые и сотые доли миллиметра, и их можно наблюдать только через микроскоп. Кроме того, зёрна перемещаются в пространстве со скоростями десятки метров в секунду и прямое наблюдение за ними можно организовать только с использованием скоростных и сверхскоростных видеока-

мер. Сюда добавляется также то, что на единице поверхности шлифовального инструмента могут находиться сотни зёрен, каждое из которых обладает своими особенностями и изнашивается по-своему. В силу этих причин на практике преимущественно изучают не износ отдельных зёрен, а всего инструмента в целом, контролируя его размерный (объёмный) или массовый износ.

Вместе с тем, существуют и методы оценки износа отдельных зёрен. К ним относятся: метод резания единичным зерном [224], анализ частиц шлама, образующегося при шлифовании [178], снятие профилограмм с рабочей поверхности инструмента [70, 77, 274], фотометрический метод [173, 295], использование растрового электронного микроскопа [171] и высокоскоростных видеокамер [258].

Анализ перечисленных методов, их достоинств и недостатков привёл к выводу о необходимости поиска альтернативного подхода к решению задачи по исследованию износа зёрен. Таким достаточно результативным подходом, как оказалось, является метод моделирования [194], который взят за основу в данной работе. Сущность его состоит в том, что изготавливались модели отрезных шлифовальных кругов (рисунок 2.44), отличавшиеся от стандартных инструментов двумя особенностями – наличием оптически прозрачной связки и однорядным расположением зёрен.



Рисунок 2.44 – Внешний вид модели отрезного шлифовального круга из оптически прозрачной связки и однорядным расположением зёрен 13А 200Н (F10)

Прозрачная связка обеспечивала возможность визуального изучения контуров зёрен на рабочей поверхности инструмента, а однорядное расположение зёрен в исключало перекрытие одних контуров зёрен другими. В качестве оптически прозрачной связки для моделей кругов использовалась эпоксидная смола, физико-механические свойства которой близки к свойствам бакелитовой связки (фенол-формальдегидной смолы). Применение эпоксидной смолы обусловлено также тем, что данный материал применяется в качестве связующего при изготовлении некоторых типов шлифовальных инструментов, например, – шлифовальных шеверов [206]. Кроме того, эпоксидная смола демонстрирует значительно большую прочность и износостойкость в моделях шлифовальных кругов по сравнению с другими прозрачными полимерными смолами [128].

Абразивным материалом в моделях кругов послужили зёрна нормального электрокорунда марки 13А, зернистость 200Н (F10). Такой крупный номер зернистости выбран с целью облегчения наблюдений за износом отдельных зёрен. Соотношение зёрен со связкой в моделях кругов соответствовало открытой структуре № 12 и твердости ЧТ, с тем отличием, что объём, отводимый на поры, был замещён связующим (38 % зёрен, 62 % связки). Круги имели размеры 100×2,2×32 мм и испытывались в условиях абразивно-отрезной операции на установке, смонтированной на базе станка 3А64Д. В качестве обрабатываемой заготовки использовался пруток из стали 10, диаметром 20 мм. Скорость резания составляла V=35 м/с, а усилие прижатия заготовки к кругу обеспечивалось за счёт рычажно-балансирного механизма и было равно 3 Н. Испытания моделей кругов на указанных режимах проводились путём осуществления резов, каждый продолжительностью 60 с. Испытуемым кругом осуществлялось 25 резов, причём после каждого реза производился анализ износа всех зёрен, находящихся на рабочей поверхности круга. Измерялась также длина линии реза на заготовке. Перед началом испытаний и после каждого реза модель круга укладывалась торцовой поверхностью на планшетный сканер. Изображения, получаемые сканированием, обрабатывались и анализировались при помощи специально разработанной программы для ЭВМ «Износ шлифовальных зёрен» [240]

(прил. 5, с. 358). Методика исследований и алгоритм программы состояли в следующем. Исследуемый шлифовальный круг устанавливался на сканере при помощи кондукторного устройства, обеспечивающего точную координатную и угловую фиксацию круга на поверхности сканера. Получаемые цветные изображения в первом блоке программы преобразовывались в чёрно-белые. Причём при осуществлении каждого цикла преобразования получали два изображения модели круга. Первое изображение получали при оптических настройках, позволяющих зафиксировать связующее круга (эпоксидную смолу). Второе – с оптическими настройками для фиксации только изображений зёрен. Во втором блоке программы производился анализ (рисунок 2.45).

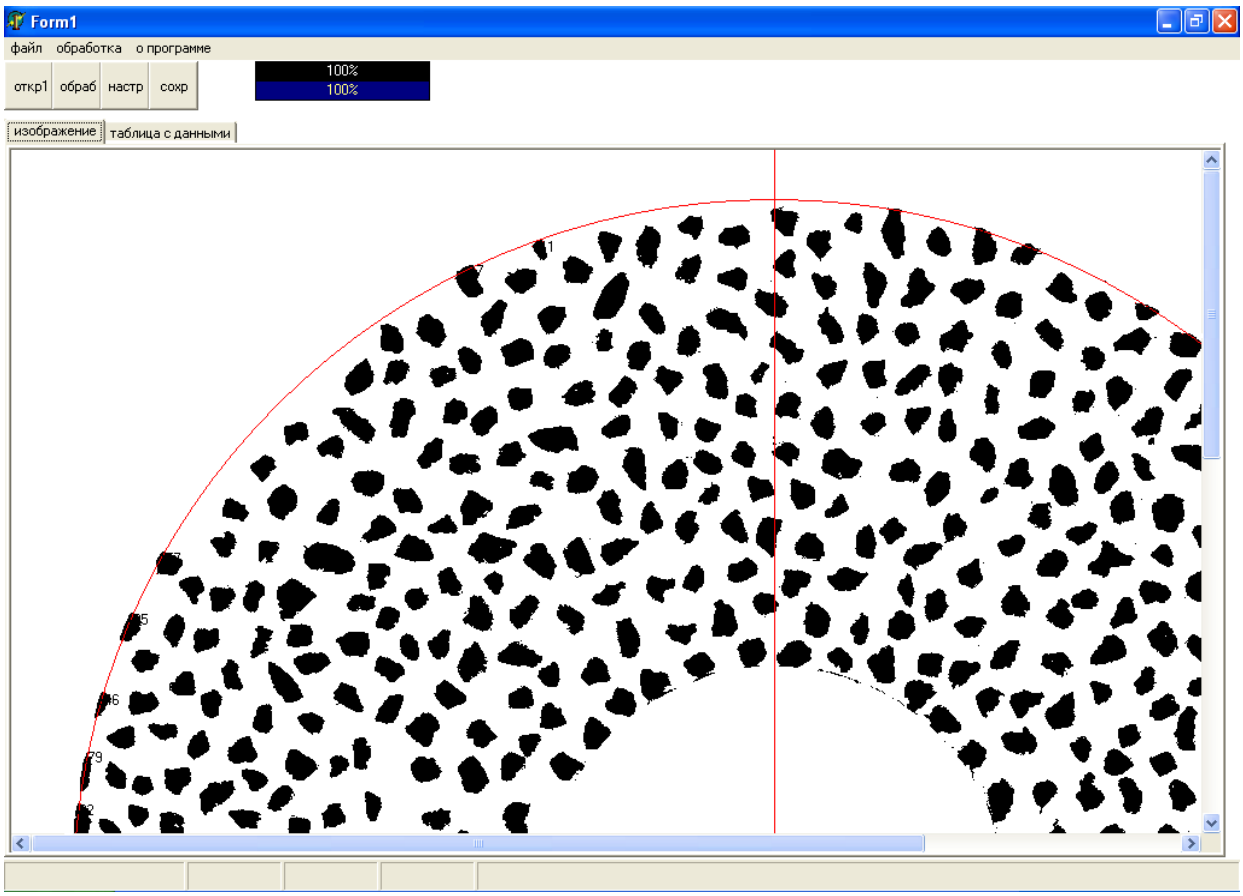


Рисунок 2.45 – Программа для ЭВМ «Износ шлифовальных зёрен» (свидетельство №2008610817), блок 2 – анализ проекций зёрен по программе

Здесь первым исследовалось изображение круга, полученное перед началом его испытаний. В результате, каждому зерну присваивался свой номер, запоминалась его координатная область и определялся коэффициент формы (на

плоскости). При последующем анализе изображений кругов (с зафиксированным связующим) получали конфигурацию контура рабочей поверхности круга. Совмещая данные контуры с изображениями, на которых зафиксированы только зёрна, программа устанавливала какие из них находятся на рабочей поверхности инструмента и определяла размеры площадок их износа. Получаемые данные сохранялись в виде таблиц Excel.

Таким образом, в процессе анализа полученного видеоряда изображений зёрен измерялись образующиеся площадки износа и визуально регистрировались разновидности износа – вырыв фрагментов зёрен, разрушение их на части или удаление целиком из связки. В итоге удавалось проследить за работой каждого единичного зерна, находящегося на поверхности круга, до момента его полного удаления из рабочего слоя. При известной частоте вращения круга и длине линии реза можно было также определить стойкость каждого единичного зерна, т.е. время его контакта с металлом. Результаты оценки износа единичных зёрен в моделях кругов с неориентированными зёрнами выборочно представлены на графике (рисунок 2.46) [115, 126].

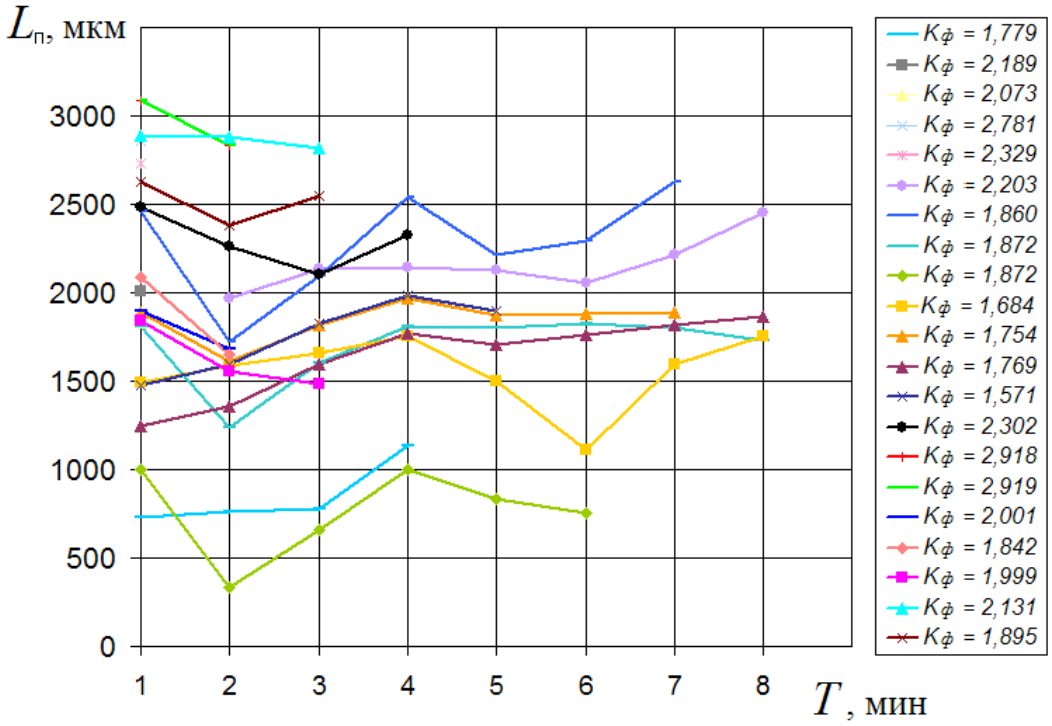


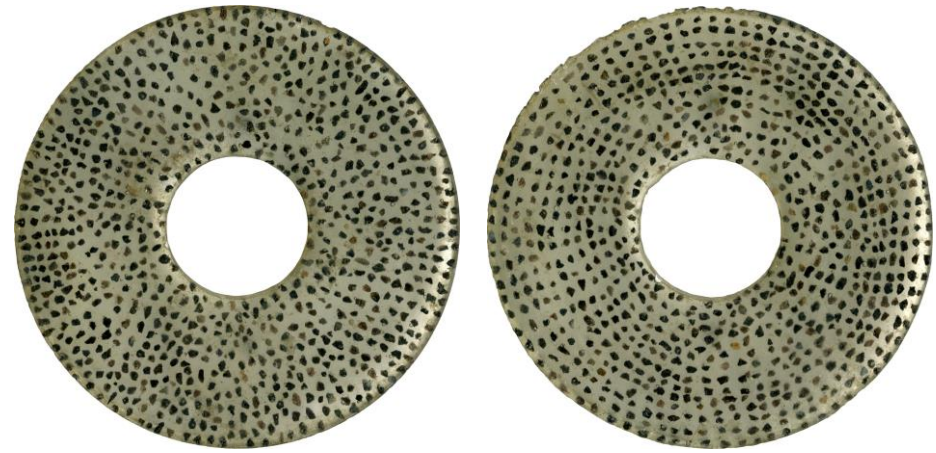
Рисунок 2.46 – Размеры площадок износа ($L_п$), образующихся на отдельных зёрнах с разной формой, до момента их удаления с рабочей поверхности модели отрезного круга

Из полученных данных следует что:

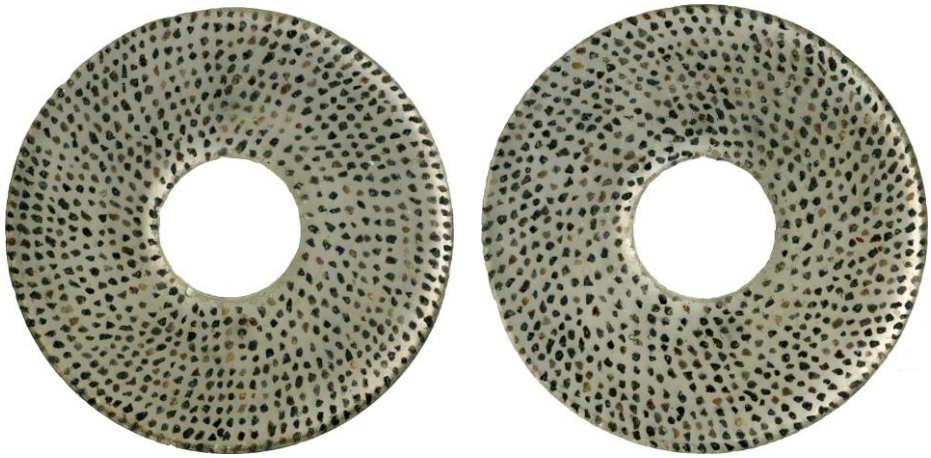
1) размер площадок износа на зёрнах в процессе резания колеблется вокруг некоторого среднего значения, постепенно увеличиваясь; 2) время работы зёрен в режиме истирания и образования площадок износа различно и для каждого зерна оно имеет свое конкретное значение; 3) полное время работы зёрен (контакта с металлом) в модели отрезного круга колеблется в интервале 0,8÷4,5 с; 4) зёрна, имеющие более вытянутую пластинчато-игольчатую форму (с большими значениями $K_ф$), обладают меньшей стойкостью; 5) для зёрен с большими коэффициентами формы характерно прерывистое участие в процессе резания, когда после нескольких резов от зерна откалывается значительная его часть и зерно вновь начинает резать, когда наружный диаметр круга несколько уменьшится; 6) длительнее всего, а также равномернее в отрезном круге работают зёрна, имеющие изометрическую форму (с малыми значениями $K_ф$); 7) разница в стойкости шлифовальных зёрен с разной формой может достигать двух и более раз.

Для исследования влияния ориентации зёрен на особенности их изнашивания в шлифовальных кругах изготавливались модели этих инструментов с радиальной (Θ=90°) и тангенциальной ориентацией зёрен (Θ=0°), а также с ориентацией зёрен вершинами навстречу направлению действия P_z (Θ=45°) и по направлению действия P_z (Θ=135°) (рисунок 2.47).

Как и в предыдущем случае, для изготовления моделей использовались зёрна марки 13А 200Н (F10), а их ориентация осуществлялась вручную при укладке в форму для изготовления кругов. Модели кругов поочередно испытывались в тех же условиях, на том же оборудовании и по той же методике, что и предыдущие модели. В результате удалось получить экспериментальные данные, отражающие взаимосвязь средних размеров площадок износа ($L_{ср}$) с коэффициентом формы ($K_ф$) и углом ориентации (Θ) зёрен (рисунок 2.47). Кроме того, получены данные, показывающие совместное влияние формы и ориентации шлифовальных зёрен на их стойкость (T) (рисунок 2.48).



а) *б)*



в) *г)*

Рисунок 2.47 – Сканированные изображения моделей отрезных кругов с ориентированными зёрнами с Θ=90° (*а*), Θ=0° (*б*), Θ=45° (*в*), Θ=135° (*г*)

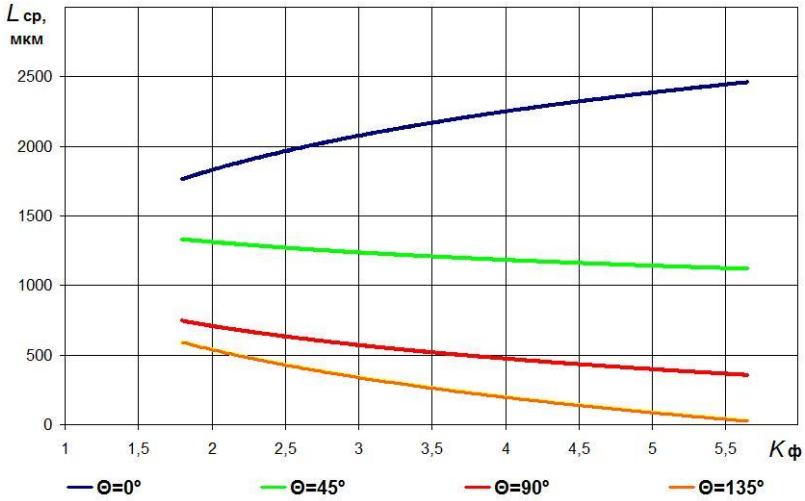


Рисунок 2.47 – Зависимости средних величин площадок износа ($L_{ср}$) зёрен 13А 200Н (F10) в моделях отрезных шлифовальных кругов от коэффициента их формы ($K_ф$) и угла ориентации (Θ)

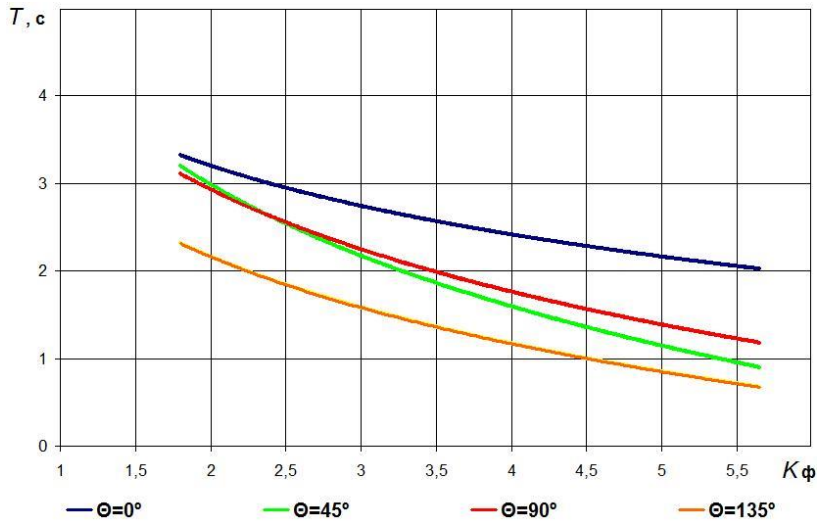


Рисунок 2.48 – Стойкость шлифовальных зёрен (T) в моделях отрезных шлифовальных кругов в зависимости от коэффициента их формы ($K_ф$) и угла ориентации (Θ)

Полученные зависимости средних величин площадок износа шлифовальных зёрен ($L_{ср}$) в моделях отрезных шлифовальных кругов от их формы и ориентации (рисунок 2.48) наиболее достоверно выражаются логарифмическими моделями следующего вида:

Θ=0° : $L_{ср} = 1404{,}2 + 608{,}25 \cdot Ln(K_ф)$; (2.49)

Θ=45° : $L_{ср} = 1439 - 186{,}11 \cdot Ln(K_ф)$; (2.50)

Θ=90° : $L_{ср} = 942{,}55 - 339{,}60 \cdot Ln(K_ф)$; (2.51)

Θ=135°: $L_{ср} = 880{,}65 - 493{,}98 \cdot Ln(K_ф)$; (2.52)

Опытные данные о зависимости стойкости зёрен (T) в моделях отрезных шлифовальных кругов от их формы и ориентации (рис. 2.49) аналогично предыдущему случаю выражаются через логарифмические модели вида:

Θ=0° : $T = 3{,}989 - 1{,}135 \cdot Ln(K_ф)$; (2.53)

Θ=45° : $T = 4{,}382 - 2{,}011 \cdot Ln(K_ф)$; (2.54)

Θ=90° : $T = 4{,}100 - 1{,}687 \cdot Ln(K_ф)$; (2.55)

Θ=135°: $T = 3{,}158 - 1{,}433 \cdot Ln(K_ф)$; (2.56)

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод о том, что ориентация зёрен ощутимо сказывается на особенностях и величине их износа. Так, зёрна с тангенциальной ориентацией (Θ=0°) имеют наибольший размер

площадок износа по сравнению с зёрнами, ориентированными под другими углами. Далее, по убыванию площадок износа, следует вариант ориентации зёрен вершинами навстречу P_z (Θ=45°), а затем радиально ориентированные зёрна (Θ=90°). Наименьшие площадки износа фиксируется при ориентации зёрен вершинами по направлению действия P_z (Θ=135°), что объясняется наименьшей стойкостью зёрен при данном угле ориентации и характером их износа – интенсивным скалыванием и объёмным разрушением. Следует также отметить, что по мере роста коэффициента формы (в данном случае от $K_ф$≈1,7 до $K_ф$≈5,5) у зёрен с тангенциальной ориентацией (Θ=0°) наблюдается увеличение размеров площадок износа (на 41 %), а при всех других вариантах их ориентации – уменьшение (например, у радиально ориентированных зёрен – на 52 %).

Разница площадок износа зёрен при различных углах ориентации и близких коэффициентах формы весьма существенна и чем больше $K_ф$, тем она выше. Так, например, тангенциально ориентированные зёрна имеют в 2,4÷6,9 раза больший размер $L_{ср}$, по сравнению с их радиальным расположением, и в 1,3÷2,2 раза по сравнению с зёрнами, ориентированными под углом Θ=45°.

Установлено также, что при всех углах ориентации зёрен их стойкость (T) уменьшается с ростом коэффициента формы. Наибольшей стойкостью характеризуются тангенциально ориентированные зёрна (Θ=0°). Далее, по-убыванию, следует случай их радиальной ориентации (Θ=90°). Здесь стойкость зёрен на 6÷32 % ниже, чем при их тангенциальной ориентации, причём эта разница возрастает по мере увеличения коэффициента формы.

Стойкость зёрен, ориентированных вершинами навстречу направлению действия P_z (под углом Θ=45°), в среднем, несколько ниже, но близка к стойкости радиально ориентированных зёрен (отличается на 3÷14 %).

Для зёрен, ориентированных под углами Θ=90° и Θ=45° (особенно с большими коэффициентами формы) характерно скалывание значительной их части (до половины и более), в результате чего зерно вновь начинает участвовать в процессе резания только после пропорционального уменьшения наружного диаметра круга.

Наименьшей стойкостью характеризуются зёрна, ориентированные вершинами по направлению P_z (Θ=135°). Для них особенно характерен износ скалыванием, объёмным разрушением, а также быстрый вырыв из связки. Этот эффект дополнительно усиливается тем, что вырыв или раскалывание единичного шлифовального зерна интенсифицирует процесс износа следующих за ним зёрен. Стойкость зёрен здесь на 30÷67 % ниже, чем у тангенциально ориентированных зёрен и на 16÷43 % ниже, чем у радиально ориентированных зёрен.

Количество зёрен, одновременно находящихся на рабочей поверхности инструмента при тангенциальной ориентации несколько ниже, чем при других вариантах их пространственного расположения.

Полученные результаты по оценке износа ориентированных зёрен с учётом фактора их формы коррелируют с результатами анализа картины напряжений, возникающих в зёрнах при работе (п. 2.6), результатами оценки прочности ориентированных зёрен (п. 2.7), а также с результатами исследований по оценке эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен (глава 5, глава 6).

2.9 Выводы по главе 2

1. Сформулирован алгоритм создания и рационального применения абразивного инструмента с контролируемой формой и ориентацией зёрен. Сущность предлагаемого алгоритма состоит в том, что для прогнозирования эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов на этапе их проектирования целесообразно изучить геометрию зёрен, из которых они изготавливаются, и установить зависимость величин передних углов зёрен от факторов их формы и ориентации. Также целесообразно установить зависимость максимальных напряжений в шлифовальных зёрнах от факторов их формы и ориентации, предварительно проанализировав схему работы шлифовального инструмента и установив величины составляющих сил резания, действующие на шлифовальные зёрна. Совместный анализ получаемых зависимостей позволяет

проектировать шлифовальные инструменты под конкретные задачи и условия обработки. Величины передних углов зёрен позволяют прогнозировать режущую способность инструментов и эффективную мощность резания, теплонапряжённость, уровень деформаций и шероховатость обрабатываемого материала при шлифовании. Уровень максимальных напряжений в зёрнах позволяет прогнозировать интенсивность износа стойкость шлифовальных инструментов.

2. Для количественной оценки формы зёрен использован существующий и разработан оригинальный методы определения коэффициентов формы соответственно на плоскости и в трёхмерном пространстве, что позволяло оперативно и точно идентифицировать форму всех зёрен, с которыми в дальнейшем проводились эксперименты и изготавливались опытные инструменты. Предложенный метод количественной оценки формы зёрен в трёхмерном пространстве основан на определении коэффициентов формы ($K_ф$), равных отношению диаметров сфер, описанных и вписанных снаружи и внутри пространств, занимаемых зёрнами. Для реализации метода разработаны специальные алгоритмы и программное обеспечение (программа для ЭВМ «Форма шлифовальных зёрен в объёме») [247].

3. Проанализированы известные технологии и оборудование для изготовления зёрен с определённой формой или выделения фракции зёрен с одинаковой формой из исходной абразивной массы. Сделан вывод о том, что с учётом затратности реализации и отладки этих технологий, а также оперативности получения конечного результата для данной работы вполне подходит вибрационный способ разделения абразивной массы на ряд фракций с одинаковой формой зёрен, который и взят за основу [207].

4. Разработаны методы и программное обеспечение (ПрЭВМ «Площадь поверхности и форма шлифовальных зёрен») [245], позволившие установить, что чем большим коэффициентом формы ($K_ф$) обладают зёрна, тем больше коэффициент развитости их поверхности ($K_р$), длины контуров ($L_к$) и площадь поверхности зёрен (S), а также тем большее их количество (N) находится в единице насыпного объёма и в объёме инструмента. Физический смысл выявленных

зависимостей состоит в том, что абразив с большими $K_ф$ зёрен имеет большую площадь контакта и, следовательно более прочное соединение со связующим (полимерным). Как результат, формируется более прочный композит «зерно–связка» и, в конечном итоге, – более прочный инструмент, например, – на бакелитовой связке. Кроме того, количество режущих элементов в объёме (и, соответственно, на рабочей поверхности) шлифовального инструмента, состоящего из игольчато-пластинчатых зёрен, больше, чем у инструментов из изометрических зёрен или из зёрен произвольной формы. Поэтому инструменты из игольчато-пластинчатых зёрен способны более производительно срезать металл.

5. Установлена зависимость величин передних углов шлифовальных зёрен от факторов их формы, пространственной ориентации в теле инструмента и износа. Для этого разработаны и зарегистрированы программы для ЭВМ «Геометрия шлифовальных зёрен», «Угол наклона шлифовальных зёрен», «Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен», «Геометрические модели шлифовальных зёрен», «Графическое построение геометрических моделей шлифовальных зёрен» [237, 238, 239, 241, 243]. С помощью программы для ЭВМ «Геометрия шлифовальных зёрен» [238], установлено, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют произвольно ориентированные зёрна (чем больше $K_ф$ зёрен) тем больше их передние углы γ. Созданный программный комплекс в составе четырёх программ для ЭВМ [238, 239, 241, 243] позволил 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 в процессе работы. С его помощью установлено, что одни и те же зёрна, по-разному ориентированные относительно плоскости резания, имеют значительную разницу величин передних углов, которая достигает 53°÷54° у изометрических зёрен марки 13А F46 ($K_ф$=1,6) и 116°÷118° у игольчато-пластинчатых зёрен ($K_ф$=4,8). При этом, в большинстве случаев, зёрна характеризуются отрицательными значениями γ. Установлено также, что передние углы зёрен достигают

максимальных значений при их ориентации вершинами навстречу силе резания P (при углах ориентации Θ=22,5°÷90°, в особенности при Θ=22,5°÷45°) и при наибольших $K_ф$. Наименьшие значения γ достигаются при тангенциальной ориентации зёрен (Θ=0°(180°)) и ориентации вершинами по направлению P_z (100°÷180°). Кроме того, установлено, что при большинстве углов ориентации (в диапазоне Θ=10°÷125°) с увеличением $K_ф$ зёрен их передние углы возрастают. У тангенциально ориентированных зёрен (Θ=0°(180°)) и зёрен с близкими направлениями ориентации (Θ=135°÷180°) наблюдается обратная картина. Установлено также, что независимо от $K_ф$ и Θ, чем дольше зерно изнашивается с образованием площадки износа, тем больше, в среднем, его передний угол. Аналогичным образом происходит увеличение передних углов зёрен с ростом сечений срезаемых стружек. Анализ полученных данных показывает, что передние углы шлифовальных зёрен соотносятся с коэффициентами их формы и углами ориентации посредством тригонометрических рядов с периодом π.

6. Разработана методика и получены результаты оценки напряжённого состояния зёрен в процессе резания с учётом факторов их формы, пространственной ориентации и глубины заделки в связку в программном комплексе «SolidWorks». Установлено, что наименьшие напряжения возникают в зёрнах при тангенциальной ориентации (Θ=0°). В диапазоне Θ=5°÷45° напряжения растут, достигая максимумов в «зоне справа» под консолью выступающей части зерна. В диапазоне Θ=45°÷67,5° происходит снижение максимальных напряжений до значений, близких к Θ=0°. Это снижение происходит в результате равномерного распределения напряжений в объёме зерна по границе заделки в связку (слева, по-центру и справа) за счёт того, что угол ориентации зерна Θ=67,5° в рассмотренном случае близок к направлению вектора силы резания P. При последующем увеличении угла ориентации до Θ=112,5°÷124° происходит значительный рост напряжений до максимальных значений, ввиду чрезвычайной концентрации напряжений в «зоне слева» под консолью выступающей части зерна. Проведённые расчёты показывают, что во всех случаях более рациональным является ориентирование зерна вершиной навстречу направлению

действия силы резания P. Установлено также, что для всех углов ориентации зёрен при увеличении их коэффициента формы максимальные напряжения существенно возрастают. С уменьшением глубины заделки зерна в связку максимальные напряжения в зёрнах также ощутимо увеличиваются. Анализ данных 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 равным π.

7. Представленный алгоритм и методология исследований, а также совместный анализ получаемых зависимостей позволяют проектировать шлифовальные инструменты с рациональной геометрией зёрен для конкретных условий обработки и параметров силового нагружения. Так, совместный анализ результатов оценки передних углов и напряжений в ориентированных шлифовальных зёрнах с контролируемой формой позволил установить, что:

– для достижения максимальных передних углов у зёрен и, соответственно, максимальной режущей способности шлифовальных инструментов необходимо применять игольчато-пластинчатые зёрна (с наибольшими $K_ф$) и ориентировать их в инструментах под углами Θ=22,5°÷90° (в особенности Θ=22,5°÷45°);

– для обеспечения максимальной стойкости шлифовальных инструментов, при прочих равных условиях, целесообразно использовать зёрна изометрической формы (с минимальными $K_ф$), а также ориентировать зёрна в тангенциальном направлении (Θ=0°)

– 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 [182, 187, 197, 258], то рациональные углы ориентации зёрен соосно силе резания находятся в диапазоне Θ=50÷84°;

– 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 Θ=65°÷75°.

8. Для проверки результатов оценки влияния формы и ориентации зёрен на их напряжённое состояние разработан метод и сконструирована установка, которая в автоматическом режиме позволяет определять усилия разрушения зёрен. С помощью данной установки проведена серия прочностных испытаний шлифовальных зёрен разных марок и зернистостей (13А 200Н (F10), 13А 100Н (F20), 13А 63Н (F30), 53С 80Н (F24)), которая подтвердила, что прочность зёрен зависит как от их формы, так и от ориентации в инструменте. Результаты исследований показали, что наиболее рациональным с точки зрения прочности зёрен при одноосном сжатии является вариант их тангенциальной ориентации (Θ=0°), далее по убыванию следует случай их радиальной ориентации (Θ=90°), когда главные оси зёрен совпадают с вектором воздействующей сжимающей нагрузки, затем Θ=67,5° (112,5°) и наименее рациональными являются углы ориентации Θ=45°÷22,5° (135°÷157,5°). 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 ($K_ф$), тем они прочнее.

9. Получены результаты исследования по оценке износа зёрен в моделях отрезных шлифовальных кругов из зёрен марки 13А 200Н (F10) из оптически прозрачной связки на базе эпоксидной смолы, близкой по свойствам бакелитовой связке. Изготовлены и испытаны модели кругов с радиальной (Θ=90°) и тангенциальной ориентацией зёрен (Θ=0°), а также с ориентацией зёрен вершинами навстречу направлению действия P_z (Θ=45°) и по направлению действия P_z (Θ=135°). Оптически прозрачная связка позволяла визуально наблюдать и анализировать с помощью специально разработанной программы для ЭВМ [207] износ каждого отдельного зерна, выходящего на рабочую поверхность

инструмента. Благодаря этому установлено, что полное время контакта с металлом (стойкость) зёрен (T) в моделях кругов колеблется в интервале 0,8÷4,5 с и зависит от формы зёрен и их ориентации в теле инструмента. При всех углах ориентации зёрен их стойкость уменьшается с ростом коэффициента формы. Наибольшей стойкостью обладают тангенциально ориентированные зёрна (Θ=0°). При Θ=90° стойкость зёрен на 6÷32 % ниже, чем при Θ=0°, причём эта разница возрастает по мере увеличения коэффициента формы. Стойкость зёрен, ориентированных вершинами навстречу P_z под углом порядка Θ=45°, в среднем, несколько ниже, но близка к стойкости радиально ориентированных зёрен (отличается на 3÷14 %). Наименьшую стойкость (на 30÷67 % ниже, чем у тангенциально ориентированных зёрен) имеют зёрна, ориентированные вершинами по направлению вектора P_z (Θ=135°). Для них характерен износ в виде скалывания, объёмного разрушения, а также быстрого вырыва из связки, что также подтверждается наименьшими величинами площадок износа у этих зёрен ($L_{ср}$).

10. Установленные зависимости (2.3)…(2.56) позволили уяснить общий механизм влияния факторов формы и ориентации зёрен на их геометрические, прочностные и стойкостные показатели и, на этой основе, перейти к этапу конструирования шлифовальных инструментов с упорядоченной геометрией зёрен.

Глава 3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ИЗ ЗЁРЕН С ЗАДАННОЙ ФОРМОЙ И ОРИЕНТАЦИЕЙ

Результаты предыдущих исследований на единичных шлифовальных зёрнах и на моделях шлифовальных кругов (глава 2) достаточно убедительно показали, что факторы формы и ориентации зёрен могут ощутимо влиять на физико-механические и режущие свойства как самих зёрен, так и инструментов, изготовленных из них. В этой связи, логичным является продолжение исследований уже не на отдельных зёрнах и моделях кругов, а непосредственно на самих шлифовальных кругах, изготовленных из зёрен с контролируемой формой и ориентацией. В данной главе рассматриваются вопросы конструирования и изготовления таких инструментов [69, 114, 132, 142, 145, 149, 159, 307].

3.1 Типовая технология производства шлифовальных кругов на бакелитовой связке

Типовая технология производства отрезных шлифовальных кругов на бакелитовой связке послужила основой для изготовления опытных инструментов. Она включает в себя следующие операции [2, 72, 89, 182, 204, 205, 206].

1. Приготовление абразивной смеси. Данная операция производится на лопастных смесителях (типа СМ) в пять переходов: 1) все компоненты смеси взвешиваются на весах для обеспечения требуемого их соотношения в готовой смеси; 2) смешиваются шлифовальные зёрна с жидким бакелитом; 3) в образующуюся вязкую смесь добавляется пульвербакелит и смешивание продолжается до получения сыпучей массы; 4) в смесь последовательно добавляется компоненты наполнителя (криолит, пирит и др.) и производится окончательное смешивание; 5) готовая смесь протирается через сито для устранения комков.

Если отрезной шлифовальный круг изготавливается из зёрен разных марок или зернистостей, то предварительно перед всеми перечисленными этапами осуществляется смешивание этих зёрен.

2. Формование кругов осуществляется в два перехода: 1) укладка абразивной смеси в прессформу. При наличии армирующих элементов этот переход дополнительно может включать: укладку нижней этикетки, нижней армирующей сетки, засыпку абразивной смеси, укладку верхней армирующей сетки, этикетки и калибровочной втулки; 2) прессование абразивной смеси. Прессование производится при удельных давлениях от 20 до 50 МПа, может быть холодным либо горячим и для его реализации используют специализированные формовочные агрегаты или универсальные гидравлические прессы (типа Д, ДЕ).

3. Подготовка кругов к термообработке. Подготовка состоит в том, что заформованные круги собирают в вертикальные пакеты на специальных штангах. При этом круги перекладывают металлическими пластинами, а собранные пакеты зажимают и закрепляют на штангах механическими фиксаторами. Делается это для того, чтобы при термообработке круги равномерно нагревались со всех сторон и не происходило их коробление в результате нагрева.

4. Термообработка кругов. Термообработка проводится в однокамерных, многокамерных или туннельных бакелизаторах (типа Б2КЭР–1,5–2,5 и др.) и состоит из трех стадий: 1) шлифовальные круги, собранные в пакеты на штангах постепенно нагревают до температуры порядка 100 °С в течение нескольких часов; 2) осуществляется многочасовой процесс бакелизации путём ступенчатого поднятия температуры до 180÷200 °С, при этом, максимальная температура нагрева и время бакелизации зависят от размеров и свойств спекаемых кругов; 3) охлаждение кругов: до температуры 140÷150 °С при выключенной, но вентилируемой печи; далее до температуре 60÷80 °С при открытых дверях бакелизатора; затем до температуры окружающей среды вне бакелизатора.

5. Отделение термообработанных кругов от оснастки. Крепления пакетов кругов на штангах освобождаются, пакеты отделяются от штанг, после чего круги отделяются от металлических пластин-прокладок.

6. Контроль качества изготовленных кругов. Изготовленные отрезные круги контролируются на: соответствие размеров с помощью мерительных инструментов; соответствие структуры на специальных стендах путём продувки

воздуха через круг; содержание оксида железа – магнитометром; соответствие твёрдости – приборами типа «Звук»; уравновешенность – путём вращения на специальных механических балансировочных стендах; механическую прочность – на специальных станках типа «СИП» с бесступенчатым регулированием скорости вращения шпинделя.

7. Упаковка шлифовальных кругов. Готовые круги, по ГОСТ 27595–88 [59] упаковывают в пакеты, термоусадочную пленку, и в картонные коробки, которые для транспортировки помещают в деревянные ящики, бочки, на поддоны или в транспортные контейнеры типа СК-3–1,5М, СК-1–3,4. Высота стопок кругов при упаковке и хранении не должна превышать 300 мм, 600 мм и 1000 мм для диаметров до 150 мм, 150÷300 мм и свыше 300 мм соответственно.

Для изготовления экспериментальных кругов с заданной формой зёрен к описанной технологии добавляется операция по предварительной сортировке зёрен по признаку формы. В случае изготовления кругов с ориентированными зёрнами к данной технологии добавляется две или одна операция: сортировка зёрен по форме и их ориентация, либо только ориентация зёрен (при использовании обычных, неупорядоченных по форме зёрен).

3.2 Изготовление шлифовальных кругов с заданной формой зёрен

3.2.1 Сепарация зёрен по форме и приготовление формовочных смесей

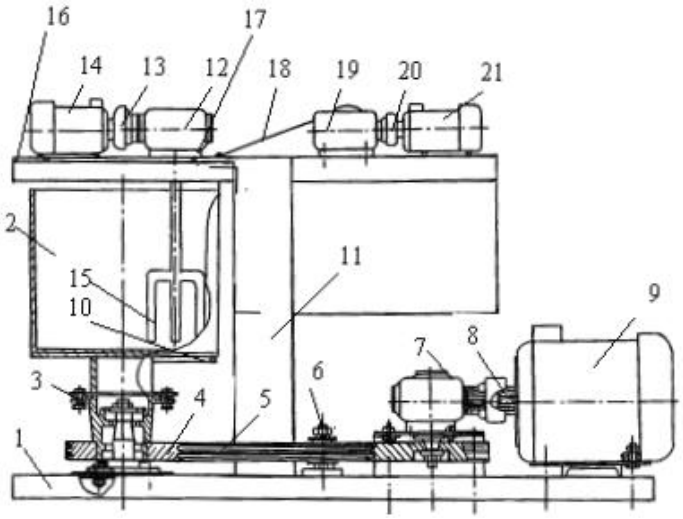
Для изготовления экспериментальных кругов использовались шлифовальные зёрна, предварительно отсортированные на вибрационном сепараторе на ряд фракций с упорядоченной контролируемой формой (п. 2.2, п. 2.3). Из полученных фракций зерен приготавливались формовочные смеси с типовой рецептурой, представленной в таблице 3.1. Для смешивания компонентов смеси использовалась специальная смесительная установка [208], внешний вид которой изображен на рисунке 3.1, *а*, и её схема представлена на рисунке 3.1, *б*.

Таблица 3.1 – Рецептура смеси для изготовления экспериментальных отрезных шлифовальных кругов

№	Компоненты смеси	Процентные доли в общем объёме смеси
1	Шлифовальные зёрна	49,64
2	Бакелит жидкий БЖ-3, РС-1079, БЖ-3А	4,65
3	Пульвербакелит СФП-012А, СФП-012А2-У12	37,21
4	Криолит	2,42
5	Пирит	6,08



а)



б)

Рисунок 3.1 – Внешний вид (*а*) и схема (*б*) смесительной установки

Отличительной особенностью установки от других известных конструкций является обеспечение тщательного смешивания компонентов за счет сложной и бесступенчато-регулируемой кинематики движений этого процесса.

Смесительная установка (рисунок 3.1, *б*) имеет станину *1*, на которой находится чаша *2*, к которой с помощью болтов *3* прикреплен ведомый шкив *4*, соединённый посредством ременной передачи *5* (с натяжителем *6*), червячного редуктора *7* и муфты *8* с электродвигателем *9*. Для выгрузки готовой смеси из чаши предусмотрен люк *10*. На вертикальной стойке *11* располагается горизонтальная площадка, на которой размещены остальные исполнительные механизмы. В их числе: червячный редуктор *12*, соединённый муфтой *13* с электродвигателем *14*, приводящим во вращение гребёнку *15*, которая перемешивает абразивную смесь, находящуюся во вращающейся чаше. Кроме вращения, гребёнка *15* имеет возможность перемещаться в чаше в радиальном направлении (вместе с двигателем *14* и редуктором *12*) по направляющим *16* с помощью роликов *17*. Обеспечивается это за счёт кривошипно-шатунного механизма *18*, приводимого в движение через червячный редуктор *19* и муфту *20* электродвигателем *21*.

Электродвигатели *9* и *14*, вращающие чашу и гребёнку, имеют бесступенчатое регулирование скорости вращения. Благодаря этому, а также возвратно-поступательному перемещению гребёнки, создаются условия для качественного перемешивания абразивной массы во всём объёме чаши и исключается возможность образования застойных зон и непромешивания. В результате достигается высокая однородность смешиваемой массы. Кроме того, возможность бесступенчатого регулирования скоростей вращения чаши и гребёнки создают предпосылки оптимизации режимов смешивания для разных марок и зернистостей шлифовальных зёрен, разных типов связок и других компонентов смеси.

При изготовлении экспериментальных отрезных шлифовальных кругов формовочные смеси готовились в следующей последовательности. В чашу засыпались шлифовальные зёрна, к ним добавлялся жидкий бакелит, после чего осуществлялось смешивание в течение 5÷6 мин. Затем в эту абразивную массу засыпался пульвербакелит и смешивался с ней в течение 5÷6 мин. По истечение

этого времени в чашу засыпались наполнители – криолит и пирит и производилось окончательное смешивание (5÷6 мин). Общая продолжительность процесса смешивания составляла 15÷20 мин. В результате получалась рассыпчатая однородная смесь, легко формующаяся при приложении сжимающей нагрузки. Точное дозирование компонентов смеси по массе осуществлялось с помощью электронных весов «CAS CS–2,5» с пределом взвешивания 2,5 кг и дискретностью индикации 0,5 г. После удаления формовочной смеси из чаши смесителя она протиралась через сито с целью удаления возможных комков и инородных включений.

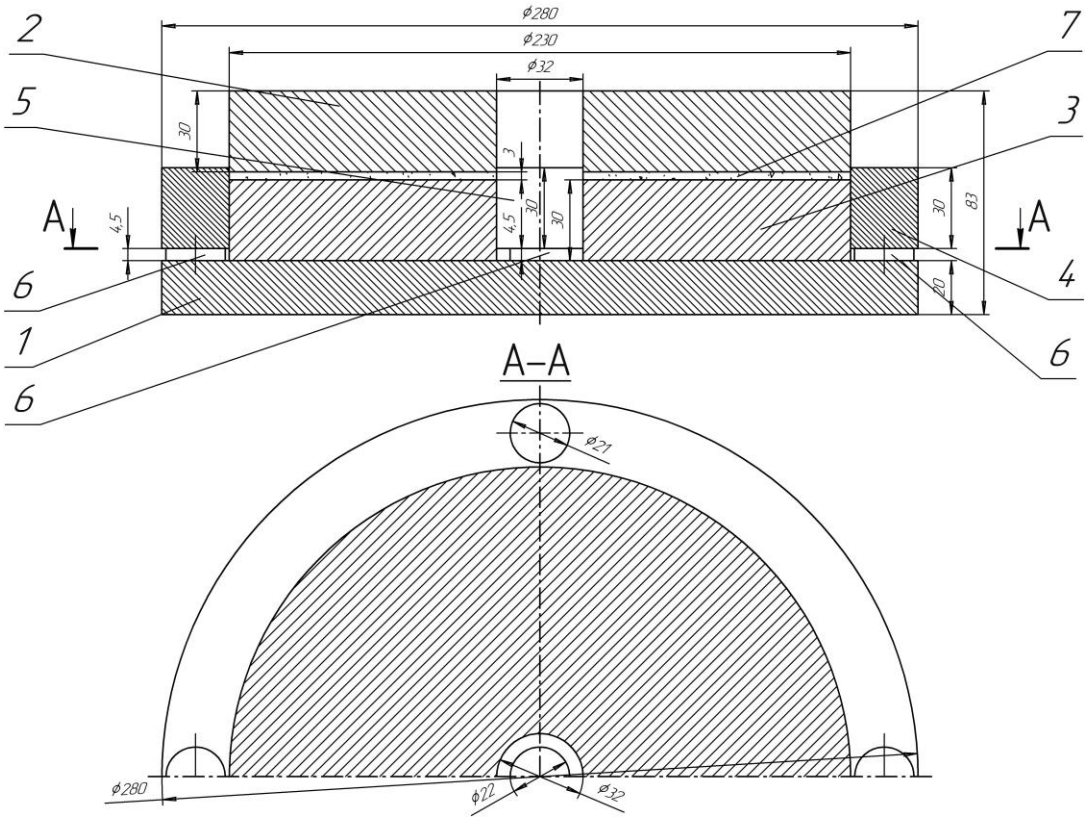
3.2.2 Формование опытных шлифовальных кругов

Для осуществления операции формования экспериментальных шлифовальных кругов спроектирована и изготовлена специальная прессформа. Данная прессформа спроектирована специально для условий опытного изготовления шлифовальных кругов. Её конструкция позволяет производить весь перечень необходимых операций, при этом обеспечена универсальность прессформы и возможность её быстрой (ручной) установки и извлечения из рабочей зоны прессового оборудования. Внешний вид прессформы изображен на рисунке 3.2, *а*, а конструкция и размеры – на рисунке 3.2, *б*.

Прессформа имеет в своём составе базовую плиту *1*, верхнюю формовочную плиту *2*, нижнюю формовочную плиту *3*, кольцо *4*, центральный штифт *5* и дискообразные упоры *6*. Прессформа позволяет формовать шлифовальные круги с наружным диаметром 230 мм, диаметрами посадочного отверстия 32 мм или 22 мм и высотой кругов в пределах 1,5÷12,5 мм. Высота формуемых кругов *7* может регулироваться за счет толщины упоров *6*, а наружный и посадочный диаметры зависят от диаметров кольца *4*, отверстий в плитах *2* и *3*, наружного диаметра штифта *5* и, при необходимости, могут быть выполнены с другими размерами. Все детали прессформы (кроме упоров) изготовлены из стали Х и закалены в масле с последующим низким отпуском на твердость HRC 62÷64.



а)



б)

Рисунок 3.2 – Внешний вид (*а*) и конструкция (*б*) прессформы для формования экспериментальных шлифовальных кругов

Конструкция прессформы обеспечивает извлечение заформованного круга без использования выталкивателя. Это достигается за счет одинаковых размеров (по высоте) кольца *4*, штифта *5* и нижней формовочной плиты *3*, а также за счет того, что регулировка высоты изготавливаемого круга осуществляется

путем вставки упоров *6* нужной высоты под кольцо *4* и штифт *5*. Благодаря этому, после формования смеси и удаления упоров из под кольца *4* и штифта *5*, последние (при постукивании) опускается вниз на базовую плиту *1* и заформованный шлифовальный круг оказывается на ровной поверхности, с которой легко снимается.

Коэффициенты усадки абразивных смесей при формовании кругов без упрочняющих стеклосеток (при усилии прессования 630 кН) составляли порядка 1,67, 1,76 и 1,88 раза для смесей на основе абразивов марок 13А 63Н (F30), 13А 40Н (F46) и 53С 32Н (F54) соответственно.

Наличие в укладываемой смеси упрочняющих стеклосеток снижало коэффициенты усадки и увеличивало высоту готовых шлифовальных кругов на величину, равную половине суммарной толщины укладываемых сеток. Все эти данные учитывались для обеспечения необходимой высоты кругов. Так, например, при изготовлении отрезных кругов с армирующими стеклосетками на основе шлифовальных зёрен марки 13А 63Н (F30), для получения необходимой высоты круга (H=3,0 мм), высота ручья прессформы и, соответственно, подкладных упоров составляла 4,5 мм.

Для формования опытных отрезных кругов с помощью описанной прессформы использовался гидравлический пресс модели ДБ2428А. Его внешний вид, вместе с рабочим столом и прессформой, представлен на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Гидравлический пресс модели ДБ2428А с рабочим столом и прессформой для формования опытных шлифовальных кругов

Основные технические характеристики пресса модели ДБ2428А: номинальное усилие прессования – 630 кН; номинальное усилие возвратного хода – 63 кН; ход ползуна – 450 мм; наибольшее расстояние между столом и ползуном – 800 мм; размеры стола пресса – 630×560 мм; номинальное усилие выталкивателя – 25 кН; ход выталкивателя – 160 мм; скорость ползуна при холостом, начальном рабочем, рабочем и возвратном ходе, соответственно – 200 мм/с, 1÷60 мм/с, 7 мм/с, 10 мм/с; скорость выталкивателя вверх, начальная рабочая (регулируемая) и рабочая, соответственно – 36÷150 мм/с, 36 мм/с; габаритные размеры пресса – 1544×1225×3174 мм; масса пресса – 3080 кг.

Формование опытных отрезных шлифовальных кругов осуществлялось при усилии прессования 630 кН (удельное давление на смесь в прессформе – 15,2 МПа), с выдержкой заформованных заготовок под давлением в течение 10÷15 с. Общее время, затрачиваемое на формование одного круга, складывалось из времени на протирку прессформы, засыпку формовочной смеси и её разравнивание, прессование круга, извлечение его из прессформы и укладку в пакет и составляло порядка 10 мин.

3.2.3 Термообработка экспериментальных кругов

Заформованные экспериментальные шлифовальные круги перед их термообработкой собирались в пакеты на специальные штанги. В пакете каждый круг отделялся от других при помощи прокладок – металлических дисков. Это предотвращало коробление кругов при термообработке и спекание их друг с другом. Собранные на штангах в пакеты круги помещались в электропечь модели ТК–96.1300L.3Ф (рисунок 3.4), предназначенную для целей термообработки опытных шлифовальных инструментов. Электропечь изготовлена на ООО «Термокерамика-ЧГ» (г. Москва) по техническому заданию, в соответствии с которым она обеспечивает возможность термообработки в автоматическом режиме твердотельных шлифовальных инструментов (шлифовальных кругов, головок, брусков) как на бакелитовой, так и на керамической связках.



Рисунок 3.4 – Камерная электропечь модели ТК–96.1300L.3Ф

Техническая характеристика камерной электропечи ТК–96.1300L.3Ф: максимальная мощность – 20,7 кВт; максимальный ток – 32 А; максимальная температура – 1300 °С; напряжение сети питания и частота переменного тока – 380 В, 50 Гц; мощность при поддержании температуры 1300 °С – 15 кВт; объём рабочей камеры – 96 л.

Электропечь имеет микропроцессорный регулятор температуры «Термоматик-L», который позволяет автоматически регулировать температуру. Рабочая программа задается в виде точек на плоскости в координатах «температура-время». Микропроцессор позволяет хранить до восьми рабочих программ. Максимальное количество точек, задаваемое в координатах «температура-время» для каждой программы равно 30. Регулятор имеет 4 режима работы: «Установка конфигурации», «Программирование», «Автоматическое управление» и «Ручное управление». Малая дискретность задания рабочей температуры (1°С) в камере электропечи и высокая разрешающая способность её измерения (1°С) позволяют качественно осуществлять термообработку шлифовальных кругов на различных типах связок.

Нагрев рабочей камеры электропечи осуществляется спиралями из сплава Х23Ю5Т (фехраль), подключенными по схеме «звезда». Спирали установлены с пяти сторон камеры электропечи (с боковых сторон, задней стенки, двери и пода), что обеспечивает минимальный перепад температур (±1°С) в разных зо-

нах камеры. Печь снабжена электрическим эжектором (вытяжкой) для удаления из рабочей камеры летучих компонентов, выделяющихся при спекании шлифовальных инструментов.

Термообработка экспериментальных шлифовальных кругов осуществлялась в соответствии с режимом, представленным на графике (рисунок 3.5).

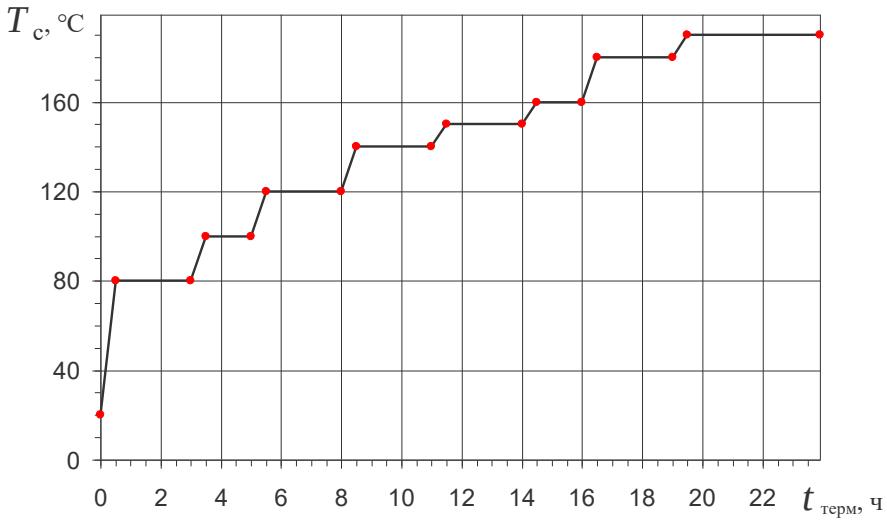


Рисунок 3.5 – График режима термообработки опытных шлифовальных кругов

При выборе режима термообработки (бакелизации) учитывался опыт изготовления отрезных кругов на бакелитовой связке, накопленный на действующих предприятиях, производящих подобную продукцию [114, 149, 308].

3.3 Изготовление шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен

3.3.1 Анализ способов ориентации зёрен в шлифовальных инструментах

Известен способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами, при котором абразивную массу, включающую металлизированные шлифовальные зёрна, укладывают в прессформу, после чего ориентируют зёрна воздействием электромагнитного поля в сочетании с ультразвуковыми колебаниями и производят прессование [11]. Недостатком этого спо-

соба является то, что для его реализации необходимо предварительно производить металлизацию шлифовальных зёрен, что требует дополнительных затрат времени и увеличивает стоимость изготовления инструмента. Кроме того, шлифовальные инструменты, включающие металлизированные зёрна, имеют ряд недостатков. Так, при их работе наблюдается более активное проявление эффекта «засаливания», т.е. покрытия рабочей поверхности инструмента плёнкой обрабатываемого материала. В результате, повышается температура в зоне резания, появляются прижоги и возникает необходимость дополнительной правки такого инструмента для удаления «засаленного» слоя.

Известен также способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами, при котором обычные неметаллизированные шлифовальные зёрна, предварительно покрытые плёнкой клея, помещают в корпус, заполненный ферромагнитной жидкостью, накладывают электромагнитное поле, под действием которого зёрна ориентируются и перемещаются к периферии корпуса, связываются между собой посредством клеевого покрытия, клей полимеризуется, образуя шлифовальный круг, после чего корпус разбирают и ферромагнитную жидкость удаляют [10]. Данный способ является технически сложным, требует применения специального клея и ферромагнитной жидкости, а номенклатура инструментов, изготавливаемых указанным способом, ограничена пористыми шлифовальными инструментами, в качестве связующего в которых может использоваться только специальный клей.

Существует также способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами, который включает приготовление абразивной смеси, укладку полученной смеси через сито в прессформу, ориентацию шлифовальных зёрен воздействием на них электростатического поля, формование шлифовального инструмента и его термическую обработку [12]. Особенностями данного способа является то, что абразивную смесь из связки в виде клинкера и шлифовальных зёрен подают в прессформу из эластичного материала, в качестве электродов для создания электростатического поля используют сито и подкладку под прессформой, напряжённость электростатического поля

увеличивают прямо пропорционально заполнению прессформы абразивной смесью, а формование осуществляют изостатическим сжатием.

К числу недостатков этого способа следует отнести: 1) малую прочность шлифовальных инструментов, изготавливаемых в соответствии с ним, что предопределяет их невысокие максимальные рабочие скорости. Это обусловлено тем, что связку, используемую для подготовки абразивной смеси, приготавливают в виде клинкера, т.е. частиц, размеры которых соизмеримы с размерами шлифовальных зёрен, а также тем, что в процессе приготовления абразивной смеси не предусмотрено смешивание зёрен с увлажнителями. Между тем, известно, что для получения прочного шлифовального инструмента с однородными свойствами целесообразно изготавливать абразивную смесь, в которой каждое шлифовальное зерно покрыто оболочкой связки [4, 182, 206]; 2) ограниченную номенклатуру шлифовальных инструментов из-за использования связки, приготовленной в виде клинкера, т.е. частиц, соизмеримых по размерам шлифовальным зёрнам. Так, связка в виде клинкера не используется при изготовлении шлифовальных инструментов на бакелитовой и глифталевой связках [4]; 3) низкую точность размеров шлифовальных инструментов, т.к. их формование осуществляется посредством изостатического сжатия, характеризующегося применением прессформ из эластичных материалов (например – резины) и специальных камер, в которых осуществляется формование путём подачи жидкости под давлением; 4) значительные затраты времени на изостатическое формование по сравнению с формованием в твердотельных прессформах, т.к. форму, заполненную абразивной смесью, герметично закрывают и помещают в специальную камеру, после чего производят формование путём подачи в камеру жидкости под давлением, затем жидкость удаляют и форму извлекают; 5) значительные затраты электроэнергии для создания электростатического поля, т.к. между электродами, предназначенными для создания электростатического поля, расположено тело (прессформа), являющееся препятствием для силовых линий поля. Кроме того, при указанном расположении электродов шлифовальные зёрна, попадая в прессформу способны под

воздействием силы тяжести изменять направление ориентации зёрен, уже находящихся в прессформе, что снижает общую эффективность ориентирования зёрен. Вместе с тем следует отметить, что электростатический эффект весьма эффективно и широко используется при изготовлении шлифовальных шкурок и лент, где зёрна ориентируют перпендикулярно основе [206].

Таким образом, анализ существующих способов ориентации зёрен в шлифовальных инструментах показывает, что наиболее перспективным по потенциальным возможностям и достигаемому результату является подход, основанный на использовании электростатического эффекта. Но он также имеет ряд недостатков, ограничивающих область его применения. С целью устранения этих недостатков в ходе выполнения исследований разработан новый способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зернами, на который получен патент на изобретение [209] (прил. 5, с. 359).

3.3.2 Предлагаемый способ ориентации зёрен и конструкции шлифовальных инструментов, изготавливаемые на его основе

В соответствии с предлагаемым способом в процессе приготовления абразивной смеси шлифовальные зёрна смешивают с увлажнителями, связующими, наполнителями и протирают полученную смесь через сито. Непосредственно в прессформе вертикально располагают электроды, представляющие из себя тонкостенные металлические пластины, при этом, электроды располагают таким образом, чтобы обеспечить требуемое направление ориентации зёрен. Поверхности прессформы, контактирующие с электродами, выполняют из диэлектрического материала. Между электродами создают электростатическое поле, после чего абразивную смесь через вибрирующее сито начинают укладывать в прессформу и делают это до того момента, когда образующийся в прессформе слой смеси достигнет требуемого уровня. После этого колебания сита, укладку абразивной смеси и действие электростатического поля прекращают, электроды извлекают вверх из прессформы. Наружную поверхность слоя абразивной смеси,

уложенной в прессформу, при необходимости разравнивают и удаляют её излишки, после чего осуществляют формование и извлекают заформованный инструмент из прессформы. Далее производят термообработку. При изготовлении шлифовальных кругов с упрочняющими элементами в виде армирующих стеклосеток и втулок в прессформу поочерёдно укладывают армирующие стеклосетки и слои абразивной смеси (ориентируя зёрна в каждом из них), а после укладки всех необходимых слоёв абразивной смеси и армирующих стеклосеток у посадочного отверстия изготавливаемого круга укладывают втулку.

В данном способе высокую размерную точность шлифовальных инструментов обеспечивают их формованием в твердотельных прессформах. Высокую механическую прочность и, как следствие, высокую максимальную рабочую скорость шлифовальных инструментов, а также широкую номенклатуру изготавливаемых инструментов обеспечивают благодаря тому, что в процессе их изготовления получают т.н. «полусухую» абразивную формовочную смесь, состоящую из гранул, каждая из которых представляет из себя абразивное зерно, равномерно покрытое связующим, что достигается тем, что в процессе приготовления смеси абразивные зёрна последовательно смешивают с увлажнителями, связующими и наполнителями и протирают полученную смесь через сито. Предлагаемым способом возможно, в частности, изготавливать шлифовальные инструменты на бакелитовой, керамической и глифталевой связках. Номенклатура изготавливаемых инструментов расширяется также благодаря тому, что предлагаемый способ позволяет изготавливать шлифовальные инструменты с упрочняющими элементами в виде армирующих стеклосеток и втулок.

Производительность изготовления шлифовальных инструментов увеличивается за счет того, что формование (прессование) осуществляют в твердотельных прессформах путём сжатия. Повышение эффективности ориентирования шлифовальных зёрен и снижение энергозатрат происходит за счёт того, что электроды помещают непосредственно в прессформу. Поэтому шлифовальные зёрна, попадая через вибрирующее сито в прессформу в виде множества отдельных гранул, эффективно ориентируются электростатическим полем. При

указанном расположении электродов отсутствует необходимость увеличивать напряжённость электростатического поля пропорционально увеличению слоя абразивной смеси в прессформе. Эффективность ориентирования шлифовальных зёрен повышается также тем, что при данном расположении электродов в прессформе их наибольшие поверхности располагаются вертикально, увеличивая зону действия электростатического поля на падающие зёрна.

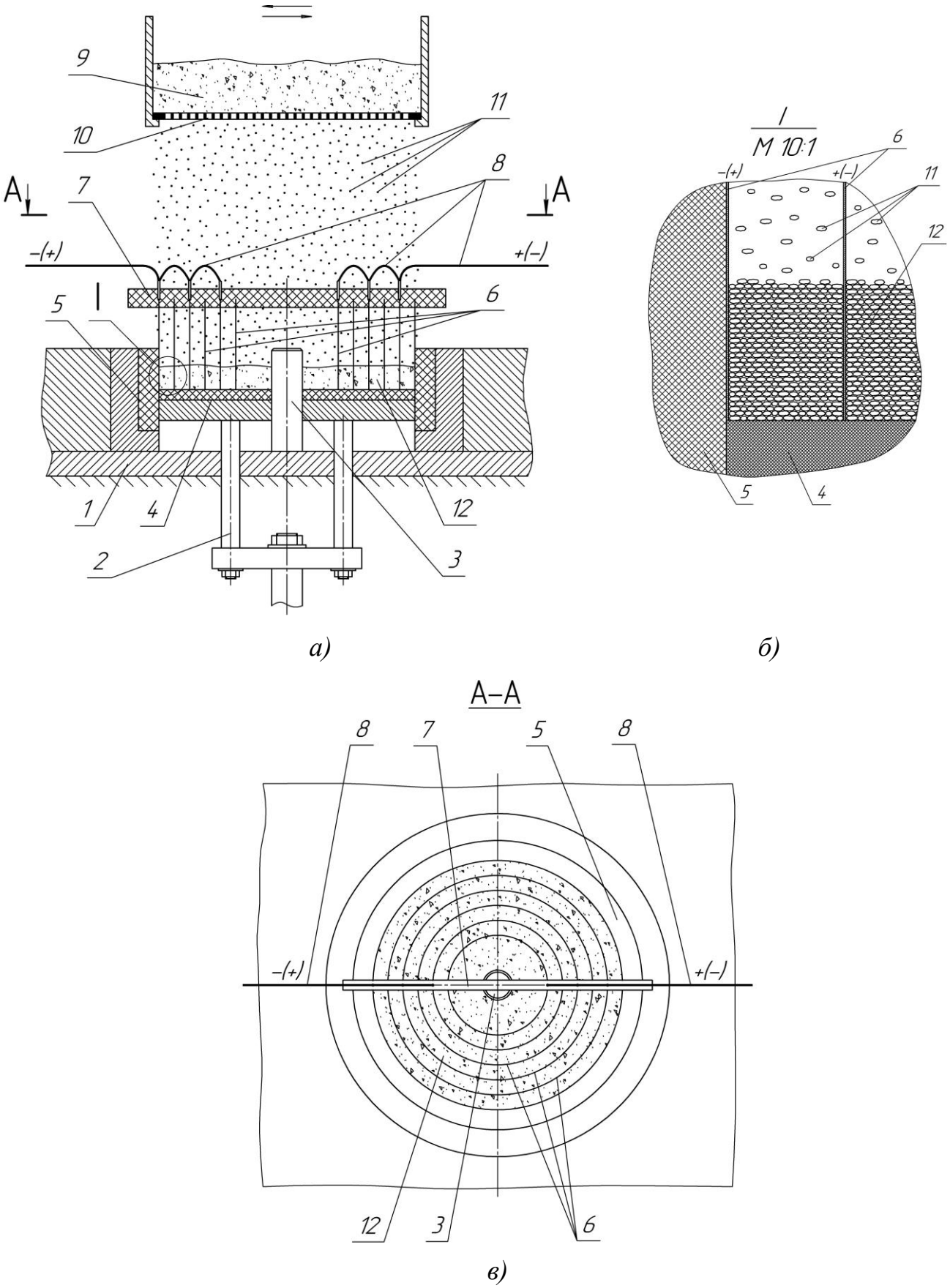
Предлагаемый способ изготовления шлифовальных инструментов с радиальной ориентацией зёрен реализуют следующим образом (рисунок 3.6, *а, б, в*).

Приготовленную абразивную смесь *9* просеивают через вибрирующее сито *10* (рисунок 3.6, *а*) и абразивные гранулы *11*, падая вниз в прессформу, входят в зону действия электростатического поля, создаваемого электродами 6, и разворачиваются в нём длинными осями вдоль силовых линий поля, образуя в прессформе слои из ориентированных зёрен *12* (см. рисунок 3.6, *б*). Электроды *6* собраны в единую конструкцию с помощью корпуса *7*, выполненного из диэлектрика и имеющего в горизонтальном сечении небольшую толщину для обеспечения беспрепятственной укладки зёрен в прессформу (рисунок 3.6, *в*).

Конструкция прессформы включает также основание *1*, выталкиватель *2* и сердечник (штифт) *3*. Для реализации предлагаемого способа могут быть также использованы прессформы, где вместо выталкивателя *2* применяются подкладные упоры, с размерами, обеспечивающими требуемую высоту формуемых инструментов (см. рисунок 3.2, *а, б*).

Для изготовления шлифовальных инструментов с тангенциальной ориентацией зёрен необходимо использовать схему укладки смеси и расположение электродов, соответственно изображенных на рисунке 3.7, *а, б* (обозначения – аналогичны рисунку 3.6). В данном случае корпус, на котором собраны электроды, представляет собой тонкое кольцо, с наружным диаметром, соответствующим размерам максимального износа круга.

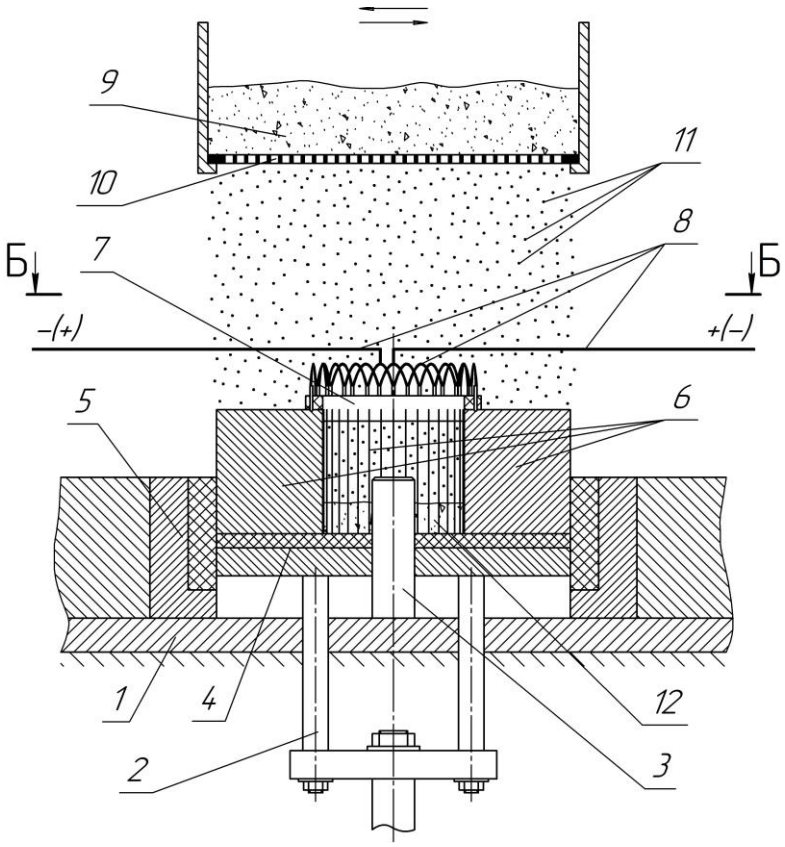
При обоих видах ориентации зёрен электроды подключены (через один) друг к другу и к источнику высокого напряжения контактами *8*, благодаря чему между любыми соседними электродами создается электростатическое поле.



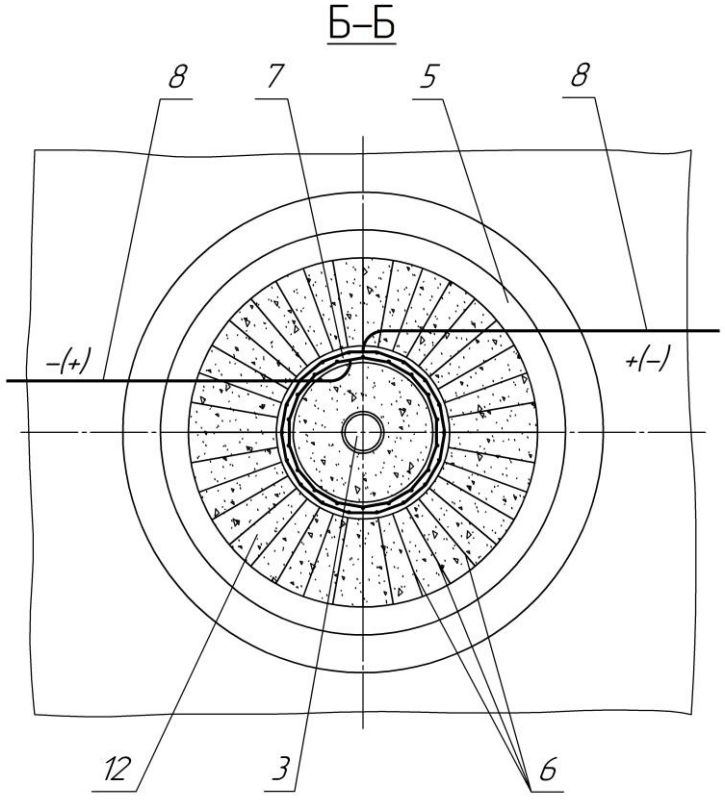
а) *б)*

в)

Рисунок 3.6 – Укладка абразивной смеси (*а*), ориентация абразивных гранул электростатическим полем (*б*), расположение электродов (*в*) при радиальной ориентации зёрен в шлифовальном круге



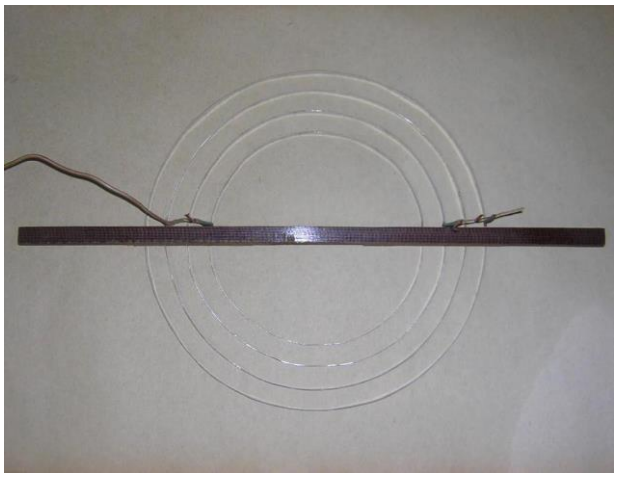
а)



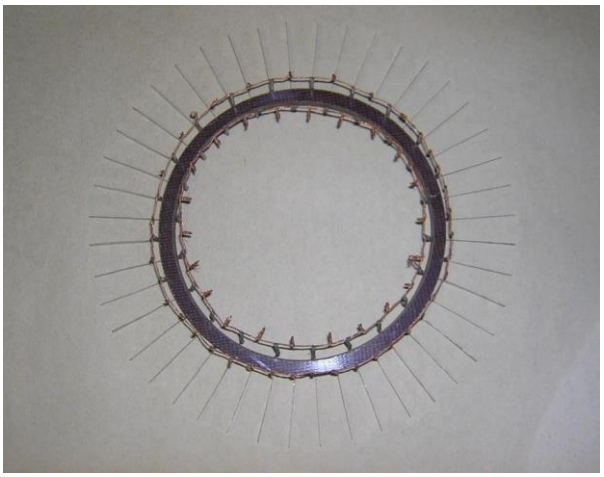
б)

Рисунок 3.7 – Укладка абразивной смеси (*а*) и расположение электродов (*б*) при тангенциальной ориентации зёрен в шлифовальном круге

Для предотвращения соприкосновения электродов с металлическими частями прессформы или возможных пробоев, её отдельные элементы (внутренняя часть кольцевой обоймы *5* и верхняя часть нижней формовочной плиты *4*) выполнены из диэлектрических материалов (рисунок 3.8).



а)



б)



в)

Рисунок 3.8 – Блоки электродов для радиального (*а*) и тангенциального (*б*) ориентирования зёрен в шлифовальных кругах, а также прессформа с контактирующими с электродами рабочими поверхностями из текстолита (*в*)

Электроды необходимо извлекать из прессформы, поднимая их строго вверх для того, чтобы избежать смещения и нарушения ориентации шлифо-

вальных зёрен, находящихся в прессформе. Следует также отметить, что размер отверстий в сите должен быть таким, чтобы абразивная смесь укладывалась в прессформу не в виде сплошной массы, а в виде множества отдельных зёрен-гранул, которые, попадая в прессформу, беспрепятственно ориентируются электростатическим полем, прежде чем их закроют последующие зёрна.

Предлагаемый способ позволяет изготавливать шлифовальные круги различных типов с ориентированными зёрнами. Кроме того, этот способ можно использовать для изготовления таких шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами, как бруски, сегменты, головки. При этом могут быть применены все типы связующих, не являющихся проводниками и пригодных к образованию сыпучих формовочных масс.

Предлагаемый способ позволяет ориентировать зёрна не только радиально и тангенциально, но и под другими рациональными углами в промежутке между этими двумя положениями, если электроды располагать под некоторым углом по отношению к их радиальному направлению [132, 159] (рисунок 3.9).

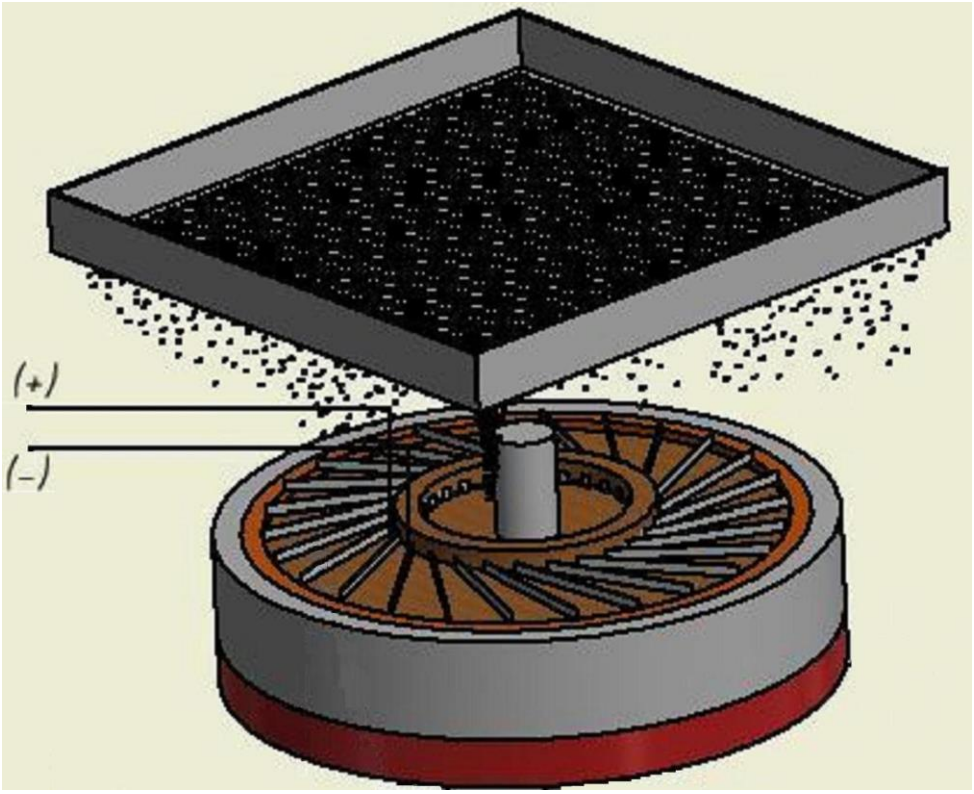


Рисунок 3.9 – Укладка абразивной смеси и расположение электродов при наклонной ориентации зёрен в шлифовальном круге

3.3.3 Изготовление шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен

На основе описанного способа [209] изготовлены отрезные шлифовальные круги без армирующих элементов Тип 41 230×3×32 13А F46 [Θ] S B 50 м/с (230×3×32 13А 40Н [Θ] Т2 Б 50 м/с) и с упрочняющими стеклосетками и калибровочной втулкой с характеристикой Тип 41 230×4×32 13А F46 [Θ] S BF 80 m/s (230×4×32 13А 40Н [Θ] Т2 БУ 80 м/с), имеющие зёрна, ориентированные в радиальном (Θ=90°) и тангенциальном (Θ=0°) направлениях. Для сравнения эксплуатационных показателей этих экспериментальных кругов со стандартными инструментами, в одинаковых условиях были изготовлены отрезные круги с аналогичными характеристиками, но без ориентации зёрен.

Технология изготовления экспериментальных кругов включала следующие этапы. Зерна нормального электрокорунда марки 13А, зернистостью 40Н (F46) ($K_ф$≈2,4) согласно рецептуре, описанной в разделе 3.2.1, последовательно смешивали с увлажнителем (жидким бакелитом), связующим (пульвербакелитом) и наполнителями (криолитом и пиритом). Полученную смесь, для исключения комков и инородных включений, протирали через сито. После этого готовую смесь помещали на сито, расположенное над прессформой, и посредством механических колебаний сита начинали укладывать смесь в прессформу. В случае изготовления кругов с упрочняющими элементами в прессформу, перед засыпкой абразивной смеси, клали нижнюю стеклосетку, а после заполнения прессформы – верхнюю стеклосетку и калибровочную втулку.

При изготовлении кругов с радиальной ориентацией, смесь засыпали через концентрическую систему электродов (рисунок 3.6). Толщина электродов, изготовленных из луженой жести, составляла 0,2 мм, а их минимальный диаметр – 130 мм (т.е. диаметр предельного износа кругов с наружным диаметром 230 мм). В качестве электрода с наибольшим диаметром (230 мм) использовалось кольцо прессформы без вставки из диэлектрического материала. Расстояние между электродами подбиралось экспериментально, исходя из свойств абразивной смеси и напряженности электростатического поля. При величине

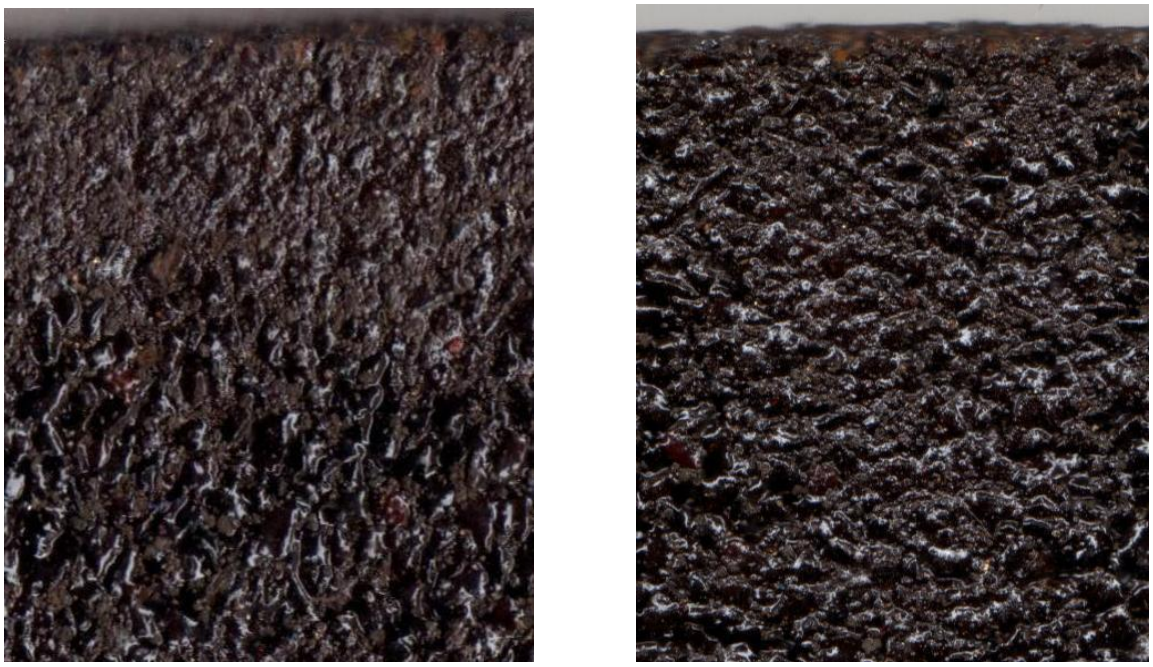
напряжения 9 кВ минимальное расстояние, при котором между электродами начинал возникать пробой, равнялось 8 мм. Поэтому, с запасом надежности от пробоев и исходя из условия эффективного ориентирования зёрен (фиксируемого визуально), было выбрано расстояние 12,5 мм.

При изготовлении кругов с тангенциальной ориентацией абразивных зёрен электроды имели форму прямоугольных пластин, размещённых вдоль радиусов и расположенных под углом 8°11' друг к другу (рисунок 3.7). В данном случае линейное расстояние между электродами на корпусе блока электродов (на диаметре 130 мм) составляло 9,2 мм, на периферии (на диаметре 230 мм) было равно 16,4 мм, т.е. в среднем составляло 12,5 мм. Из диэлектрического материала (текстолита) здесь была выполнена не только верхняя часть нижней формовочной плиты прессформы, но и внутренняя часть её кольца. Следует отметить, что во всех случаях высота электродов равнялась предельной высоте слоя абразивной смеси, укладываемой в прессформу. Этот размер выбран исходя из того, что при большей высоте электродов на поверхность их свободных частей (не покрываемых слоем смеси) под действием электростатического поля осаживается тонкий слой из мелкодисперсных пылевидных частиц связки и наполнителей. Кроме того, при высоте электродов, равной необходимой высоте слоя абразивной смеси, отчётливо фиксируется момент, когда необходимо прекращать укладку смеси.

После засыпки смеси в прессформу электроды (той или иной конструкции) аккуратно вынимались из неё (выдвигались вверх). Излишки абразивной смеси, выступающей за уровень кольца прессформы, удаляли. Затем смесь подвергали прессованию. Данную операцию осуществляли на гидравлическом прессе модели ДБ2428А при усилии F=630 кН. Заформованные шлифовальные круги извлекали из прессформы, укладывали в пакет, перемежая стальными дисками, и подвергали термообработке в электропечи модели ТК-96.1300.L.3Ф в течение 24 часов, согласно режимному графику (рисунок 3.5). Изготовленные экспериментальные (с ориентированными зёрнами) и стандартные (без ориентации зёрен) шлифовальные круги подвергали типовой проверке на механиче-

скую прочность (прочность на разрыв). Проверку проводили динамическим способом (согласно ГОСТ 30513–97, ГОСТ 12.3.028–82 и ГОСТ Р 52588–2011), при котором испытуемые круги вращали требуемое время (5 мин), со скоростью, превышающей рабочую скорость в 1,3 раза. Проверку осуществляли с помощью специально разработанного и изготовленного стенда [154], конструкция которого описана в главе 4. В результате было установлено, что все испытанные круги не разрушились и пригодны для работы на окружных скоростях 50 м/с (круги без упрочняющих элементов) и 80 м/с (круги, упрочненные стеклосетками) соответственно, согласно ГОСТ 21963–2002 и ГОСТ Р 57978–2017.

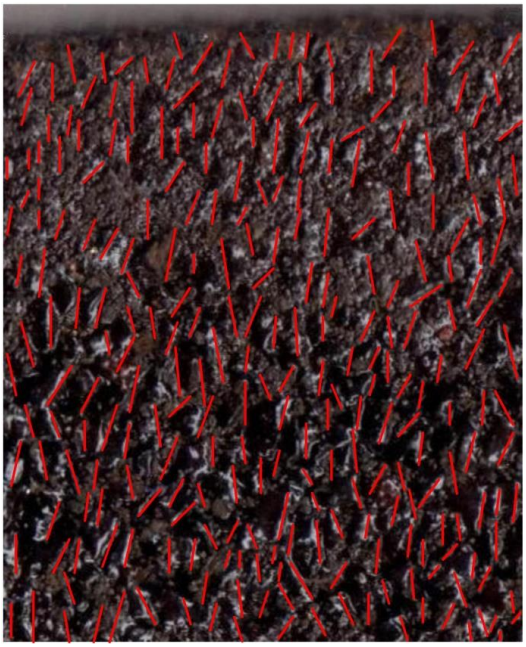
В соответствии с описанной технологией изготовлены опытные партии шлифовальных кругов, эффективность ориентирования зёрен в которых и преимущества по отношению к стандартным инструментам наглядно подтверждаются при рассмотрении торцевых поверхностей этих инструментов (рисунок 3.10), а также результатами их комплексных испытаний в лабораторных и производственных условиях (глава 6).



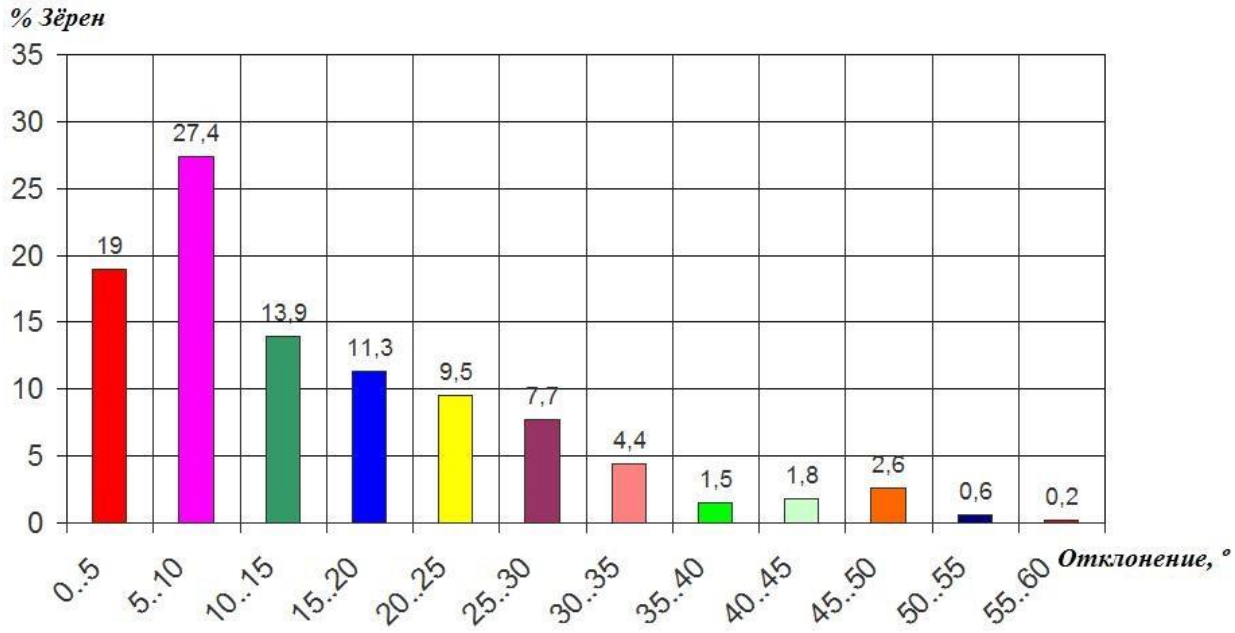
а) *б)*

Рисунок 3.10 – Радиальная (*а*) и тангенциальная (*б*) ориентации зёрен в шлифовальных кругах Тип 41 230×3×32 13А F46 [Θ] S B 50 м/с (изображения получены сканированием с разрешением 1200 dpi)

Анализ изображений торцовых поверхностей шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с без упрочняющих стеклосеток, полученных цветным сканированием с разрешением 1200 dpi, позволил установить процент зёрен, ориентированных с тем или иным отклонением относительно заданного направления ориентирования [69] (рисунок 3.11).



а)



б)

Рисунок 3.11 – Изображение торцовой поверхности круга с радиальной ориентацией зёрен после обработки в редакторе «Компас» (*а*) и результаты оценки отклонений зёрен от заданного направления ориентирования (*б*)

Обработка и анализ изображений производился в графическом редакторе «Компас». Линиями красного цвета проводились наибольшие оси зёрен, после чего измерялись углы между главными осями зёрен и заданным направлением их ориентации. Первоначально измерения углов проводилось непосредственно в редакторе «Компас». Затем, для повышения производительности обработки изображений шлифовальных инструментов и измерения углов ориентации зёрен была разработана специальная программа для ЭВМ «Угол наклона зёрен в шлифовальных инструментах» [242] (прил. 5, с. 360). Алгоритмы программы позволяют определять углы ориентации зёрен Θ и величину их отклонения в градусах от заданного направления ориентирования, а получаемые результаты сохраняются в виде таблиц Excel.

Исследования эффективности ориентации зёрен в шлифовальных кругах Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с показали, что порядка 19% зёрен имеют отклонение от заданного направления ориентирования не более 5°. Около 27% зёрен отклоняются от заданного направления в пределах 5…10°. Порядка 14% зёрен имеют отклонение в пределах 10...15°, а порядка 11% – в пределах 15...20° и далее по убыванию. Таким образом, исследования показали, что около 60% зёрен в опытных кругах сориентированы с отклонением от заданного направления ориентации не более 15°.

Следует также отметить, что общее время, затрачиваемое на формование одного круга с ориентированными зёрнами, складывающееся из времени на подготовку прессформы, укладки в неё абразивной формовочной смеси с одновременным ориентированием зёрен, прессования круга, извлечения его из прессформы и укладки в пакет для последующей термообработки, увеличилось по сравнению со стандартной технологией изготовления кругов примерно в 2 раза и составило на примененном оборудовании и оснастке для мелкосерийного производства кругов порядка 20 мин. Увеличение времени вызвано необходимостью установки и извлечения блоков электродов из прессформы и, преимущественно, постепенной подачей абразивной смеси через вибрирующее сито в форму, что увеличило себестоимость изготовления кругов примерно на 5–7%.

3.4 Шлифовальные круги повышенной прочности

3.4.1 Анализ возможных путей повышения прочности шлифовальных кругов

К числу известных способов повышения прочности шлифовальных кругов относятся:

– уменьшение соотношения между размерами посадочных отверстий и наружными диаметрами кругов;

– создание кругов без центрального (посадочного) отверстия;

– увеличение высоты круга по мере приближения от периферии к посадочному отверстию;

– применение высокопрочных связок и зёрен, повышение их адгезионного взаимодействия и создание высокопрочных композитов за счёт совершенствования состава наполнителей;

– армирование пор в кругах путём металлизации их внутреннего пространства или использование в качестве пор керамических (или стеклянных) микросфер;

– импрегнирование посадочного отверстия (или всего круга) смолами, клеями и серой;

– изготовление кругов из зёрен мелких зернистостей (всего инструмента или его части вблизи посадочного отверстия);

– применение армирующих элементов различных конструкций (бандажи, сетки, спирали, кольца, втулки) [85, 97, 177, 194, 258, 273].

Из перечисленных путей повышения прочности для отрезных шлифовальных кругов наиболее перспективны (по конструктивным, технологическим, финансовым соображениям и скорости достижения конечного результата) два последних способа. Они имеют к настоящему времени ряд конкретных исполнений. В их число входит способ изготовления шлифовальных кругов повышенной прочности на бакелитовой связке, который включает: приготовление двух абразивных смесей, т.е. смешивание шлифовальных зёрен с увлажнителя-

ми, связующими и наполнителями, при этом в одной из смесей размер шлифовальных зёрен (зернистость) меньше, чем в другой; укладку полученных смесей в прессформу, причем смесь с меньшим размером шлифовальных зёрен укладывается в концентрическую зону у посадочного отверстия шлифовального круга, ограниченную предельным диаметром износа круга; укладку у посадочного отверстия круга металлической втулки; формование шлифовального круга, извлечение его из прессформы, а также последующую термическую обработку [4, 205, 206]. Недостатком данного способа является то, что не предусмотрено армирование шлифовального круга стеклосетками. Кроме того, не учитывается, что форма шлифовальных зёрен, из которых изготавливается шлифовальный круг, влияет на его прочность [96, 97, 194].

Известен также способ изготовления шлифовальных кругов повышенной прочности на бакелитовой связке, который включает смешивание шлифовальных зёрен с увлажнителями, связующими и наполнителями, укладку смеси, а также армирующих стеклосеток (стеклотканей) в прессформу, укладку у посадочного отверстия круга металлической втулки, формование шлифовального круга, извлечение его из прессформы и последующую термическую обработку [4, 206]. Недостатком данного способа является то, что в нем не предусмотрено упрочнение зоны у посадочного отверстия круга путём изготовления её из зёрен мелких зернистостей. В случае изготовления круга целиком из зёрен мелкой зернистости (с целью повышения его прочности), производительность операции шлифования снижается из-за уменьшения размеров стружек, срезаемых зёрнами. [89, 169]. В данном способе также не учитывается то, что форма шлифовальных зёрен влияет на прочность шлифовальных инструментов.

Существует также способ изготовления отрезных шлифовальных кругов, где шлифовальные зёрна смешивают со связкой, укладывают полученную массу в прессформу, формуют и термообрабатывают шлифовальный круг, при этом, используют шлифовальные зёрна одинаковой игольчатой формы [96]. Недостатком этого способа является то что круги, состоящие целиком из зёрен игольчато-пластинчатой формы, склонны к интенсивному износу, что нивели-

рует положительный эффект от повышенной прочности во всём объёме конструкции получаемых шлифовальных кругов. В то же время, известно, что процесс разрушения шлифовального круга при его вращении начинается от посадочного отверстия. Поэтому, для повышения прочности круга, целесообразным является упрочнение именно зоны у его посадочного отверстия (например, путём изготовления данной зоны из зёрен мелких зернистостей), что не предусмотрено в известном способе. Другим недостатком этого способа является то, что при изготовлении шлифовального круга целиком из зёрен мелкой зернистости с игольчатой формой, производительность шлифования может снизиться.

Таким образом, анализ рассмотренных способов показывает, что они либо не позволяют эффективно решить задачу по повышению прочности шлифовальных кругов, либо не полностью используют имеющиеся для этого потенциальные возможности.

3.4.2 Предлагаемый способ повышения прочности шлифовальных кругов и его реализация

Установлено, что чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют абразивные зерна, тем больше площадь их поверхности и тем большее их количество содержится в насыпном объёме абразива и соответственно в объёме шлифовального инструмента, что дополнительно повышает площадь контакта зёрен со связующим (п. 2.4). При увеличении площади поверхности зёрен улучшается их адгезия с полимерной (например, – с бакелитовой) связкой, зёрна в большей мере воспринимают действующую нагрузку и, как следствие, напряжения во вращающемся шлифовальном круге распределяются по зёрнам и связке более равномерно. Поэтому шлифовальные круги на бакелитовой связке, изготовленные целиком из зёрен с контролируемой игольчато-пластинчатой формой, обладают большей разрывной прочностью, по сравнению со стандартными кругами из зёрен произвольной формы [73, 135, 136].

Известно также, что с уменьшением зернистости шлифовальных зёрен

возрастает разрывная прочность шлифовальных кругов [194, 258]. Однако, повышать прочность круга путём изготовления его целиком из мелких зёрен игольчато-пластинчатых разновидностей нерационально, т.к. с уменьшением зернистости абразива производительность шлифования снижается. Круги из зёрен такой формы также интенсивнее изнашиваются при работе. Кроме того, для формирования всего объёма круга из зёрен игольчато-пластинчатых разновидностей требуются большие затраты на упорядочивание абразива по форме, в сравнении с изготовлением кругов согласно предлагаемого способа.

В предлагаемом способе, на который получен патент на изобретение [210] (прил. 5, с. 361), прочность шлифовального круга повышают путём укладки в процессе его изготовления в концентрическую зону у посадочного отверстия абразивной смеси, в которой используют зёрна меньшей, чем в остальной части круга, зернистости, с контролируемой игольчато-пластинчатой формой, которые предварительно упорядочивают по форме. При этом для усиления эффекта повышения прочности круга могут быть дополнительно применены армирующие элементы, например, – армирующие стеклосетки и втулки.

Сущность способа поясняется на рисунке 3.12, где представлен в разрезе шлифовальный круг повышенной прочности.

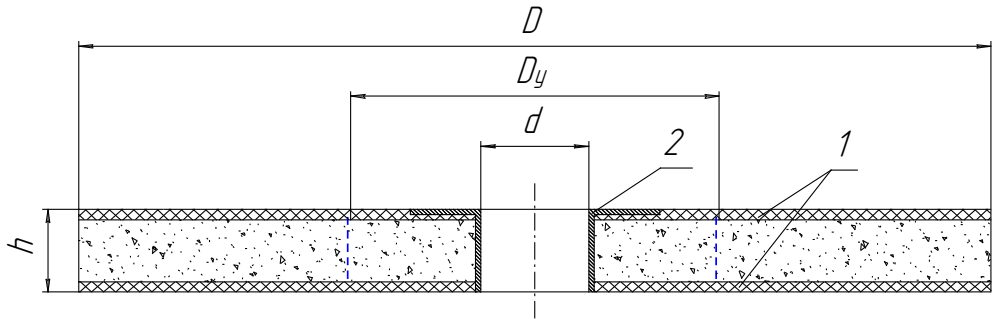


Рисунок 3.12 – Конструкция отрезного шлифовального круга повышенной прочности

Здесь (рисунок 3.12) на шлифовальном круге: упрочненная концентрическая зона у посадочного отверстия выделена пунктирной линией; D – наружный диаметр круга; d – диаметр посадочного отверстия круга; $D_у$ – диаметр

упрочненной зоны у посадочного отверстия шлифовального круга, выполненной из шлифовальных зёрен меньшей, чем в остальной части круга, зернистости, с игольчато-пластинчатой формой; *h* – высота круга; *1* – армирующие стеклосетки; *2* – металлическая втулка (позиции *1* и *2* могут отсутствовать).

Осуществляется предлагаемый способ изготовления шлифовальных кругов повышенной прочности на бакелитовой связке следующим образом. Берутся шлифовальные зёрна двух разных номеров зернистости. Шлифовальные зёрна меньшей зернистости упорядочивают по форме, например, путём разделения исходных зёрен по форме на сепараторах, а также путём непосредственного изготовления зёрен заданной формы. Шлифовальные зёрна большей зернистости выбирают исходя из необходимых эксплуатационных характеристик изготавливаемого круга: марки абразива, размера зёрен, твёрдости, номера структуры, а также (если в этом есть необходимость) формы зёрен. После этого приготавливают две абразивные смеси, которые укладывают с армирующими элементами (или без них) в прессформу. Причём смесь с меньшим размером шлифовальных зёрен с контролируемой игольчато-пластинчатой формой укладывают в концентрическую зону у посадочного отверстия шлифовального круга, ограниченную предельным диаметром износа круга. В конце укладывают в прессформу у посадочного отверстия круга металлическую втулку (или обходятся без нее) и производят формование (прессование) шлифовального круга, после чего извлекают круг из прессформы и подвергают термической обработке.

Предлагаемым способом была изготовлена партия отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×22 13AF30 / 53CF54 [$K_ф$] S B (230×3×22 13А63Н / 53С32Н [$K_ф$] Т2 Б, без упрочняющих сеток и втулок), а также партия кругов Тип 41 230×3×22 13AF30 / 53CF54 [$K_ф$] S BF (230×3×22 13А63Н / 53С32Н [$K_ф$] Т2 БУ, с армирующими стеклосетками и втулками). При этом в качестве шлифовальных зёрен большей зернистости были использованы зёрна нормального электрокорунда марки 13А с номером зернистости 63Н (F30), а для изготовления упрочненной концентрической зоны у посадочного отверстия шлифовальных кругов были использованы зёрна карбида кремния черного марки 53С с но-

мером зернистости 32Н (F54) и упорядоченной контролируемой формой.

Упорядочение зёрен карбида кремния по форме проводилось путём разделения исходной массы абразива, изготовленной по типовой технологии, на вибрационном сепараторе (п. 2.3). Количественно форма зёрен контролировалась при помощи коэффициента формы ($K_ф$) в трёхмерном пространстве (п. 2.2). Коэффициент формы зёрен нормального электрокорунда марки 13А 63Н (F30) составил $K_ф$≈2,46; коэффициент формы исходных зёрен карбида кремния черного марки 53С 32Н (F54) был равен $K_ф$ ≈2,74; а коэффициент формы зёрен карбида кремния черного марки 53С 32Н (F54), игольчато-пластинчатой формы, использованных для создания упрочненной концентрической зоны у посадочного отверстия кругов, соответствовал $K_ф$≈3,31. Диаметр упрочненной зоны у посадочного отверстия кругов был взят равным 100 мм, поскольку конструкция угловых шлифовальных машин и стационарных станков, на которых используют данный тип отрезных шлифовальных кругов, позволяет изнашивать шлифовальный круг до диаметра 110÷130 мм.

После разделения исходных шлифовальных зёрен по форме, приготавливались две абразивные смеси, для чего смешивались шлифовальные зёрна с увлажнителями (жидкий бакелит), связующими (пульвербакелит) и наполнителями (пирит, криолит). Укладка смесей производилась следующим образом. Сначала в прессформу устанавливался (надевался на центральный штифт) диск, высота которого соответствовала высоте укладываемого слоя абразивной смеси (высоте ручья прессформы), наружный диаметр которого был равен 100 мм. После этого в прессформу укладывалась смесь из зёрен большей зернистости (13АF30). Уложенная смесь разравнивалась, её излишки удалялись, после чего диск извлекался из прессформы. В результате освобождалось пространство для укладки смеси в зону у посадочного отверстия. Перед укладкой смеси в данную зону, прессформа накрывалась тонким металлическим листом, имеющим отверстие Ø100 мм, причём отверстие размещалось симметрично над зоной у посадочного отверстия. После этого производилась укладка смеси из зёрен меньшей зернистости с контролируемой формой (53СF54). Уложенная смесь раз-

равнивалась и удалялись её излишки, после чего лист снимался. Указанная последовательность действий и приспособления позволяли избежать смешивания двух абразивных смесей. Кроме того, толщиной металлического листа (0,6 мм), которым накрывали прессформу, нивелировалась разница в коэффициентах усадки смесей из зёрен разных зернистостей. Так, с уменьшением номера зернистости уменьшается насыпная плотность абразива и увеличивается коэффициент усадки абразивных смесей. Соответственно, при обеспечении одинаковой твёрдости (плотности упаковки) двух смесей в одном круге, их слои в прессформе должны несколько отличаться по высоте (п. 3.2.2).

При изготовлении отрезных шлифовальных кругов, дополнительно упрочненных стеклосетками и втулками, порядок перечисленных действий был аналогичным. Разница состояла в том, что одну из стеклосеток укладывали в прессформу перед укладкой смесей, а вторую – после данной операции. Кроме того, после второй стеклосетки в прессформу (у посадочного отверстия круга) укладывали металлическую втулку.

Дополнительные операции по упорядочению формы зёрен и раздельной укладке абразивных смесей в прессформу несколько увеличили трудоемкость и себестоимость изготовления шлифовальных кругов примерно на 10–12%.

После размещения в прессформе всех исходных компонентов производили операцию формования шлифовального круга на гидравлическом прессе модели ДБ2428А. Затем отформованный шлифовальный круг извлекали из прессформы и укладывали в пакет на штангу, отделяя от других кругов металлическими дисками. Последующая термообработка кругов производилась в камерной электропечи модели ТК-96.1300.L.3Ф в течение 24 часов (режим термообработки представлен в п. 3.2.3).

Для обеспечения достоверности сопоставления и выявления влияния формы зёрен, расположенных у посадочного отверстия отрезных кругов на их прочность, тем же способом, на том же оборудовании и за один технологический цикл были изготовлены опытные круги, у которых в зоне у посадочного отверстия применялись исходные зёрна марки 53CF54, неразделённые по фор-

ме ($K_ф$≈2,74), а также зёрна изометрической формы ($K_ф$≈1,87). Кроме того, для сравнения эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов повышенной прочности, изготовленных предлагаемым способом, со шлифовальными кругами, производимыми типовым способом (из зёрен одной зернистости), на том же оборудовании и за один технический цикл изготовлены отрезные круги, целиком состоящие из абразивной смеси на основе шлифовальных зёрен марки 13AF30 ($K_ф$≈2,46).

В соответствии с предлагаемым способом, на оборудовании и по технологии, описанным выше, изготовлены опытные партии шлифовальных кругов, которые в дальнейшем прошли комплексные испытания в лабораториях и в производственных условиях, результаты которых изложены в глава 4 и главе 5.

3.5 Выводы по главе 3

1. Шлифовальные инструменты с контролируемой геометрией режущих элементов отличаются от обычных инструментов наличием зёрен, упорядоченных по форме и их упорядоченным пространственным расположением (ориентацией) в теле инструмента.

2. Для изготовления опытных шлифовальных кругов с контролируемой геометрией зёрен за основу была взята типовая технология изготовления шлифовальных кругов на бакелитовой связке, модернизированная добавлением операции предварительной сортировки зёрен по форме и ориентацией зёрен в инструменте. Технология была полностью (от начальной до конечной операции) реализована в лабораторных условиях.

3. Для изготовления шлифовальных инструментов с контролируемой ориентацией зёрен разработан способ, основанный на использовании электростатического эффекта. На данный способ получен патент на изобретение (Пат. 2369474 РФ) [209]. На основе данного способа были изготовлены партии экспериментальных отрезных шлифовальных кругов (без армирующих и с армирующими элементами), в которых шлифовальные зёрна ориентировали в радиаль-

ном и тангенциальном направлениях.

4. Исследования эффективности ориентации зёрен в опытных шлифовальных кругах показали, что порядка 60% зёрен в опытных кругах сориентированы с отклонением от заданного направления ориентации не более 15°. Для оценки эффективности ориентирования зёрен разработана методика и программа для ЭВМ «Угол наклона зёрен в шлифовальных инструментах» [242].

5. Для повышения прочности шлифовальных кругов предложен способ, основанный на упрочнении зоны вблизи посадочного отверстия круга зернами мелких зернистостей с контролируемой формой. На данный способ также получен патент на изобретение (Пат. 2349446 РФ) [210] и на его основе изготовлены партии отрезных шлифовальных кругов (как с армирующими элементами, так и без них), которые, в дальнейшем, испытывались при различных рабочих скоростях.

6. Для изготовления экспериментальных шлифовальных кругов было использовано специальное технологическое оборудование, в том числе: вибрационный сепаратор (Пат. 2248851 РФ) [207], смесительная установка (Пат. 2221632 РФ) [208], гидравлический пресс ДБ 2428А; камерная электропечь ТК-96.1300L.ЗФ с микропроцессором; а также была разработана и изготовлена специальная технологическая оснастка, в т.ч. комплекты прессформ (в обычном исполнении и с диэлектрическими рабочими поверхностями), оснастка для раздельной укладки абразивных смесей в различные зоны прессформы, блоки электродов для ориентации зёрен в инструментах.

7. Введение в технологический процесс изготовления шлифовальных инструментов операций ориентирования зёрен и упорядочения формы зёрен несколько увеличило трудоемкость и себестоимость изготовления инструментов примерно на 5–7% и 10–12% соответственно.

При изготовлении опытных шлифовальных кругов применен опыт, полученный во время осуществления деловых визитов и стажировок на заводах-производителях шлифовальных инструментов, – ОАО «Юргинские абразивы» и «Rottluff» GmbH (Германия).

Глава 4 ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗЁРЕН НА ПРОЧНОСТЬ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

Прочность шлифовальных кругов является одним из наиболее важных эксплуатационных параметров этих инструментов [71, 85, 97, 182, 194, 258, 259, 273]. Это обусловлено тем, что шлифовальные круги, в отличие от других инструментов, работают в специфических условиях – на скоростях, насчитывающих десятки метров в секунду.

Разрыв круга при таких скоростях сопряжен с рядом отрицательных последствий, в числе которых – возможное травмирования оператора, поломка станка, порча обрабатываемой детали. Поэтому фактору прочности круга придают большое внимание и она, в опосредованном виде, как величина допустимой рабочей скорости, присутствует в характеристике каждого инструмента. С другой стороны, установлено, что увеличение скоростей шлифования в основном положительно влияет на выходные параметры этого процесса, такие как производительность и качество обработки. Как следствие – возникла тенденция постоянного увеличения скоростей шлифования, которая особенно заметна на примере отрезных кругов. Рабочая скорость этих инструментов, за относительно короткий промежуток времени, повышена с 50÷60 м/с до 80÷100 м/с и продолжает повышаться до 125÷150 м/с. Это предъявляет ещё более жесткие требования к прочности шлифовальных кругов и, вместе с тем, стимулирует поиски путей её эффективного контроля и рационального повышения.

В данной главе рассматриваются вопросы оценки прочности шлифовальных кругов на основе динамических и статических методов, описываются разработанные стенды и устройства для контроля этого показателя, изучаются пути повышения прочности кругов за счёт подбора формы зёрен в этих инструментах. При этом рассматривается вариант подбора формы зёрен для инструментов в целом и вариант использования зёрен с контролируемой формой только вблизи зоны посадочного отверстия шлифовальных кругов, наиболее нагруженной от действия центробежной силы.

4.1 Анализ динамических методов оценки разрывной прочности шлифовальных кругов

Шлифовальные круги – это инструменты повышенной опасности. В связи с этим, при производстве и приёмке заказчиком шлифовальных кругов, помимо таких параметров, как соответствие размерам, номеру структуры, твёрдости, в обязательном порядке проводится контроль кругов на неуравновешенность (динамическую сбалансированность) и их испытание на механическую прочность. Для обеспечения безопасной работы на шлифовальном оборудовании последний параметр контроля представляется особенно важным [158]. В настоящее время существуют два направления по испытанию шлифовальных кругов на прочность: первое – это испытание кругов на основе динамических методов (вращением); второе – испытание кругов с помощью статических методов.

Динамические методы реализуются на специальных станках, общий принцип работы которых состоит в раскручивании кругов до скоростей, превышающих рабочие на определенные величины, с некоторой выдержкой по времени или без неё (перед началом эксплуатации инструментов), либо в увеличении скорости вращения кругов до момента их разрушения (для установления предела их прочности при производстве и определения максимально допустимой рабочей скорости кругов через коэффициент запаса прочности).

В Российской Федерации динамические испытания на прочность по ГОСТ 12.3.028–82 [64], ГОСТ Р 52588–2011 [52] и ГОСТ 30513–97 [51] являются обязательными для всех типов шлифовальных кругов, разрыв которых при работе представляет опасность для человека. Не подвергаются проверке лишь особо малые шлифовальные круги и головки. Среднегабаритные и, в особенности, крупногабаритные круги подвергаются стопроцентной проверке.

Статические методы основаны на том, что силы, возникающие при работе шлифовального круга, имитируют, прикладывая нагрузку к неподвижному кругу или к специальным образцам, например, вырезанным из него или изготовленным в аналогичных технологических условиях. Данные методы пока не за-

меняют полностью динамических методов испытания. В связи с этим существует необходимость совершенствования станков для испытания кругов на механическую прочность, так как с повышением рабочей скорости кругов повышается и скорость их испытания.

К настоящему времени в нашей стране созданы и эксплуатируются станки для испытания шлифовальных кругов на разрывную динамическую прочность моделей СИП, АИП, и др. [4, 51, 204, 205].

Станки серии СИП представляют собой многочисленную группу станков, созданных в разное время, разными заводами и предназначенных для контроля прочности кругов различных габаритов с превышением их рабочей скорости до 1,5÷1,65 раз. В первую подгруппу этой серии входят однокамерные станки СИП-40 и СИП-80 для испытания шлифовальных инструментов малых размеров. Диаметры испытываемых кругов на этих станках составляют 32–40 мм и 50–125 мм соответственно, а максимальные частоты вращения шпинделей, – 71000 об/мин и 46000 об/мин. Шпиндели у этих станков раскручиваются воздушной турбиной. Вторая подгруппа оборудования серии СИП – это двухкамерные станки СИП2-350 и СИП-800 для испытания шлифовальных кругов, работающих со скоростями 60÷80 м/с, с диаметрами 150–350 мм, 150–750 мм и максимальными частотами вращения шпинделей 11460 об/мин и 10500 об/мин соответственно. Третья подгруппа оборудования серии СИП – это однокамерные станки моделей СИП-400К1, СИП-800К1 и СИП-1000С, предназначенные для испытания на прочность кругов, работающих со скоростями до 100÷125 м/с и выше. Диаметры испытываемых кругов здесь составляют 115–400 мм, 150–800 мм и 600–1000 мм соответственно, а максимальные частоты вращения шпинделей достигают 18000 об/мин, 11460 об/мин и 4350 об/мин.

Близкими характеристиками обладают однокамерные станки белорусского производства серии СР: СР-400, СР-450, СР-750, СР-800. Диаметры испытываемых кругов у станков этого модельного ряда составляют соответственно 115–400 мм, 200–400 мм, 500–1060 мм, 150–800 мм, а максимальные частоты вращения шпинделей 20000 об/мин, 15000 об/мин, 3000 об/мин и 11460 об/мин.

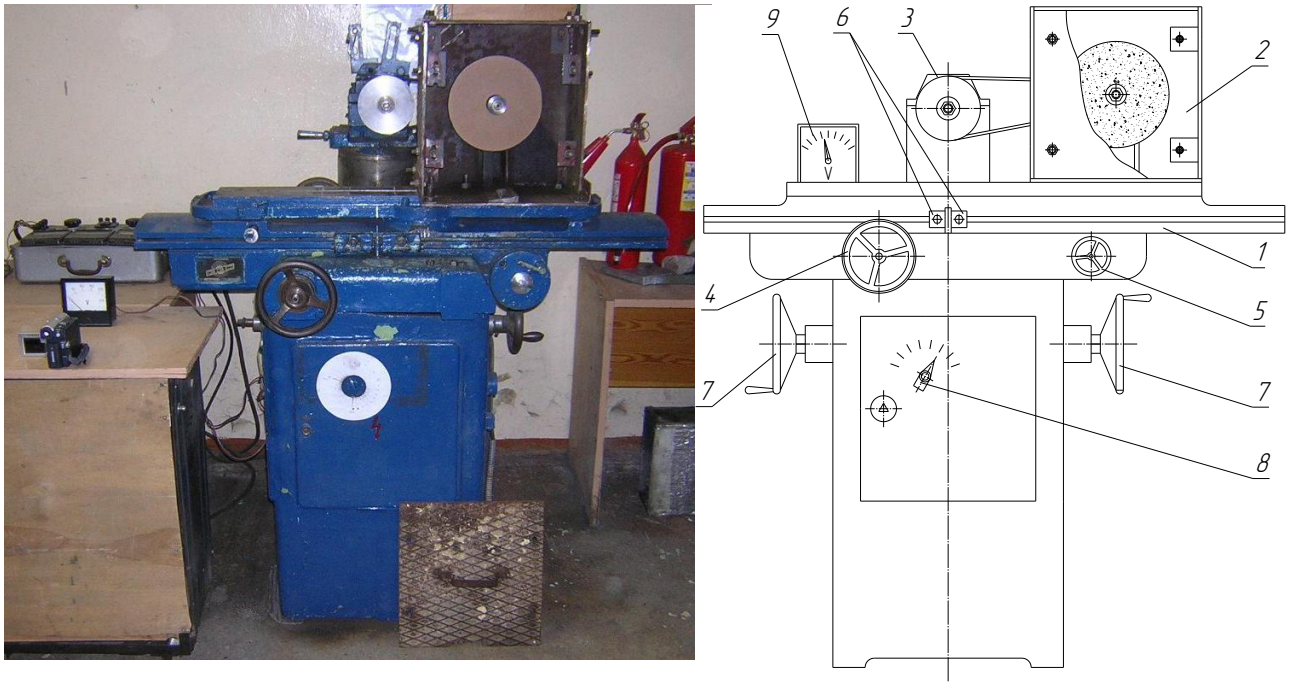
Станки моделей АИП-200, АИП-400, АИП-800 – это однокамерные автоматы с вертикальным расположением шпинделя. Они предназначены для испытаний в условиях крупносерийного и массового производства шлифовальных кругов, работающих со скоростями до 60÷80 м/с, с превышением рабочей скорости в 1,5 раза. Станки АИП оборудованы механизмами автоматической загрузки, зажима и разжима испытываемого круга, его выгрузки, а также имеют плавный набор испытательной скорости, выдержку и выключение по заданной программе. Станки оснащены автоматически закрывающимся защитным экраном рабочей зоны, а также блокирующими и контролирующими устройствами.

Созданием и выпуском станков для испытания шлифовальных кругов на механическую прочность занимаются производители оборудования для абразивной промышленности во всех промышленно развитых странах мира. Одним из известных зарубежных изготовителей испытательных станков такого типа является итальянская фирма «Davide Maternini». Данная фирма производит следующие модели станков для испытания отрезных и обдирочных шлифовальных кругов: MDM PVM 16-230-2T с частотой вращения шпинделя до 16000 об/мин для испытания кругов диаметром до 230 мм, MDM PVM 030 с максимальной частотой вращения шпинделя 30000 об/мин для испытания кругов диаметром 115–400 мм, MDM PVM 040 с частотой вращения шпинделя до 40000 об/мин для испытания кругов диаметром 75–125 мм, MDM PVM 300 OR 050 с максимальной частотой вращения шпинделя до 50000 об/мин для испытания кругов диаметром 75–100 мм.

4.2 Стенд для прочностных испытаний шлифовальных кругов динамическим методом

Применение станков, описанных в предыдущем разделе, не всегда бывает экономически оправданно, особенно в случаях периодической проверки на прочность небольших партий шлифовальных кругов, как это бывает, например, при проведении научных исследований. Кроме того, большинство испытатель-

ных станков, имеющихся на отечественных машиностроительных предприятиях, ввиду невысоких максимальных рабочих скоростей, не позволяют определять предел прочности шлифовальных кругов, армированных стеклосетками (доводить скорость круга до его разрыва). Например, максимальная скорость вращения шпинделя у наиболее распространенного испытательного станка модели СИП-800 составляет 10500 об/мин, в то время как средние скорости разрыва обычных отрезных кругов с наружным диаметром 230 мм (предназначенных для работы со скоростью 80 м/с) составляют порядка 12000 об/мин. Вследствие этого, для проведения исследований более целесообразно использовать какой-либо готовый привод, доработанный и модернизированный под конкретную задачу. Именно такой путь реализован в данной работе при создании и последующем испытании отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен [154]. В данном случае за базу взят универсально-заточной станок модели 3А64Д, на основе которого создан специальный испытательный стенд, внешний вид и конструкция которого представлены на рисунке 4.1 *а*, *б*.



а) *б)*

Рисунок 4.1 – Внешний вид (*а*) и конструкция (*б*) стенда для динамических прочностных испытаний шлифовальных кругов

Здесь, на рабочем столе *1*, закреплена с помощью резьбовых соединений и Т-образных пазов бронекамера *2*, стенки и съёмная крышка которой выполнены из листовой стали толщиной 7 мм. В бронекамере находится шпиндельный узел, на который устанавливается испытуемый шлифовальный круг. Крышка камеры надёжно фиксируется четырьмя болтами, чем обеспечивается получение замкнутого пространства, в котором происходит последующее разрушение шлифовального круга. Шпиндель испытательной камеры кинематически связан со шпиндельным узлом станка *3* посредством клиноременной передачи. Расположение шкивов данной передачи в одной плоскости достигается посредством поперечного перемещения рабочего стола станка с помощью маховика *4*. Предварительное натяжение ремня клиноременной передачи обеспечивается продольным перемещением стола *1*, с закреплённой на нём испытательной бронекамерой *2*, посредством маховика *5*. Фиксация рабочего стола станка в необходимом положении осуществляется с помощью упоров *6*. Более точное регулирование натяжения ремня клиноременной передачи производится вертикальным перемещением шпиндельного узла *3* с помощью маховика *7*. Бесступенчатое регулирование скорости вращения шпинделя испытательной бронекамеры обеспечивается за счёт тиристорного привода и переменного резистора *8*, а контроль скорости вращения осуществляется с помощью вольтметра *9*, включённого в цепь приводного электродвигателя постоянного тока.

Кинематическая схема стенда отличается от кинематической схемы базового станка модели 3А64Д тем, что добавлено ещё одно звено. Шпиндель станка связан со шпинделем испытательной бронекамеры посредством клиноременной передачи через шкивы с соотношением делительных диаметров соответственно 2,88:1. Такое техническое решение применено для увеличения максимальной скорости вращения шпинделя бронекамеры. При конструировании шпиндельного узла бронекамеры проведён расчёт действующих при испытаниях нагрузок, выбран материал для шпинделя (сталь 40Х), назначена его термообработка (закалка в масле и высокий отпуск), а также выбраны подшипники, удовлетворяющие исходным требованиям (радиально-упорные подшипники

36204 с максимальной допустимой скоростью вращения 20000 об/мин). В результате на стенде обеспечивается бесступенчатое регулирование скорости вращения шпинделя в пределах 800÷18500 об/мин. Бронекамера и шпиндельный узел позволяют испытывать шлифовальные круги прямого профиля с максимальным диаметром до 356 мм и высотой до 10 мм. При меньших диаметрах испытуемых кругов их высота может быть увеличена до 30 мм (исходя из предельно допустимой динамической нагрузки на шпиндельный узел).

На данном стенде испытаны партии экспериментальных отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен, как с упрочняющими элементами, так и без них. При этом разрывные скорости некоторых типов кругов составляли порядка 175 м/с.

4.3 Статический способ оценки прочности шлифовальных кругов

К числу недостатков динамических методов оценки прочности шлифовальных кругов относится то, что разнообразная номенклатура шлифовальных кругов и высокие скорости вращения требуют применения в испытательных станках сложных и дорогостоящих двигателей и подшипников, механизмов бесступенчатого регулирования скорости, высокопрочных шпиндельных узлов, бронированных металлических испытательных камер. Кроме того, сам процесс получения данных о прочности кругов путём испытания их на разрыв вращением является довольно трудоёмкой, потенциально опасной и дорогостоящей операцией. В связи с этим применяются также статические методы испытания шлифовальных кругов на механическую прочность, которые основаны на том, что силы, действующие при работе шлифовального круга можно имитировать, прикладывая соответствующие нагрузки к специальным образцам [97]. Такими образцами служат, например, тела типа «восьмёрок», изготавливаемые из той же смеси, что и шлифовальные круги. Их разрушают растягивающими усилиями на разрывных машинах. Получаемый результат экстраполируют на разрывную прочность круга. Однако при сопоставлении опытных данных обнаружено

довольно большое расхождение между прочностью образцов и прочностью кругов. Аналогичным образом, для оценки прочности круга, используются результаты испытаний на изгиб образцов типа брусков. При использовании данного способа выявлено ещё большее расхождение между прочностью круга и прочностью образцов-брусков. С целью перехода от прочности на изгиб к прочности на растяжение, введён коэффициент, равный отношению величин этих прочностей. Но практика показала, что значение этого коэффициента не постоянно, а колеблется, например, для кругов на керамической связке – в пределах 2,3÷2,7 [85, 225]. Перечисленные статические методы прочностных испытаний обладают двумя существенными недостатками. Первый из них заключается в значительном расхождении опытных данных по прочности образцов и прочности кругов. Второй состоит в том, что данные методы не позволяют испытать непосредственно шлифовальные круги перед началом их эксплуатации.

Для устранения недостатков существующих методов по контролю прочности шлифовальных кругов предлагается статический способ их испытания, сущность которого заключается в том, что тангенциальные растягивающие напряжения, которые оказывают основное влияние на разрушение шлифовального круга, создаются в теле круга путём приложения равномерно распределённого давления по поверхности посадочного отверстия круга без его вращения, причём характер распределения и знак возникающих при этом тангенциальных растягивающих напряжений являются такими же, как при вращении круга. На предлагаемый способ получен патент [130, 178] (прил. 5, с. 362). Его теоретические основы разработаны исходя из анализа литературных данных. Так, известно, что в теле шлифовального круга при его вращении возникают тангенциальные и радиальные растягивающие напряжения. При этом тангенциальные напряжения имеют максимальные значения у посадочного отверстия круга, а радиальные напряжения здесь равны нулю (рисунок 4.2, *а*) [89, 97, 194, 257, 258]. Известно также, что процесс разрушения шлифовального круга при его вращении начинается именно от посадочного отверстия. Это подтверждает, например, высокоскоростная съёмка. Появившаяся микротрещина у посадочно-

го отверстия круга увеличивается и развивается в направлении к его периферии, затем появляются ещё несколько аналогичных трещин и происходит разрушение круга [228]. Таким образом, действие тангенциальных растягивающих напряжений оказывает основное влияние на разрушение шлифовальных кругов [89, 97, 182, 194, 228, 258] и оно начинается при превышении возникающими у посадочного отверстия кругов тангенциальными напряжениями предела прочности на растяжение абразивного композита. Для оценки тангенциальных растягивающих напряжений в шлифовальных кругах используют формулу, выведенную для однородных вращающихся тел типа дисков [89, 257]:

$$\sigma_t = \gamma \frac{\omega^2}{8g}(3+\mu)(b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2), \qquad (4.1)$$

где σ_t – тангенциальное напряжение в рассматриваемой точке круга; γ – плотность круга; ω – угловая скорость вращения круга; g – ускорение свободного падения; μ – коэффициент Пуассона у круга; b – наружный радиус круга; a – радиус посадочного отверстия круга; r – радиус рассматриваемой точки круга.

Из анализа литературных данных также выявлено, что тангенциальные растягивающие напряжения, аналогичные по характеру и по знаку тем, что имеют место во вращающихся шлифовальных кругах, возникают в толстостенных цилиндрах, нагружаемых внутренним давлением (рисунок 4.2, *б*) [257].

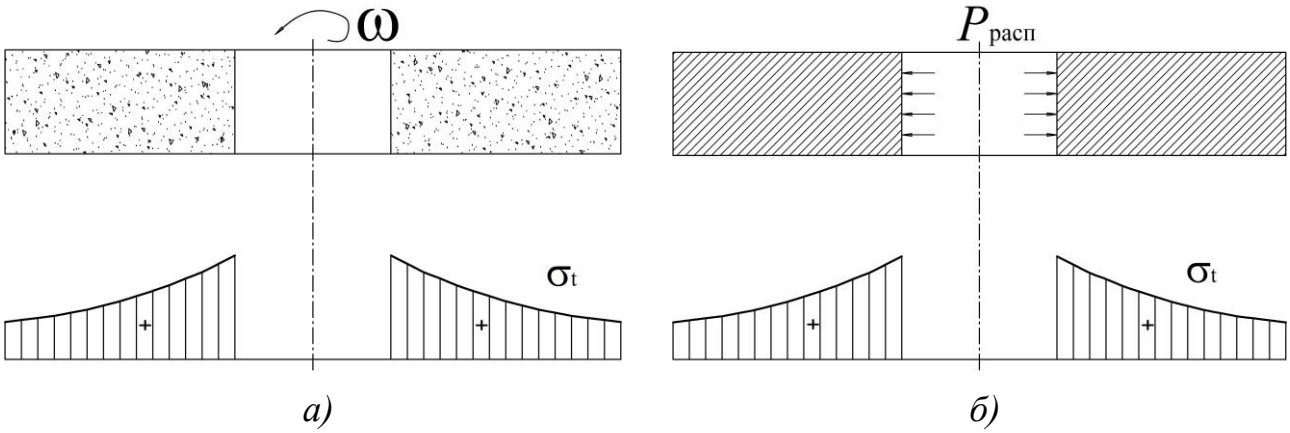


Рисунок 4.2 – Эпюры тангенциальных растягивающих напряжений во вращающемся шлифовальном круге (*а*) и в толстостенном цилиндре, нагруженном внутренним равномерно распределённым давлением (*б*)

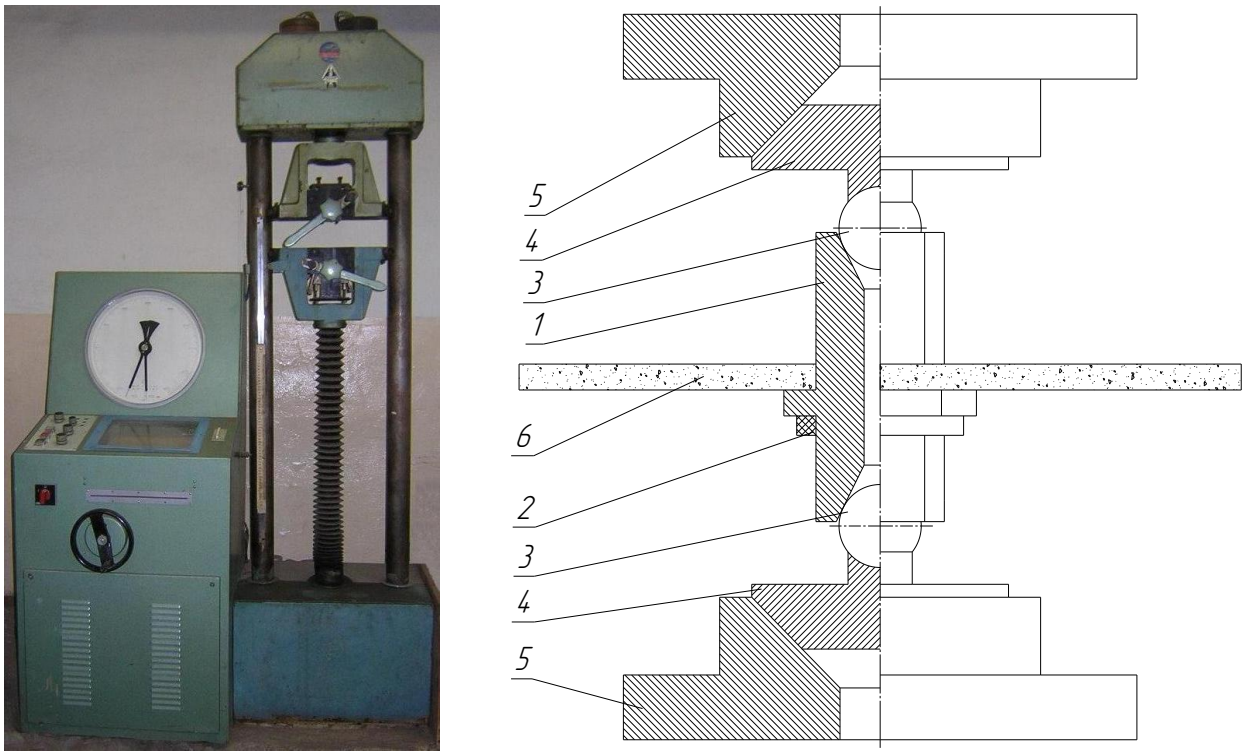
Таким образом, тангенциальные растягивающие напряжения, аналогичные тангенциальным напряжениям во вращающемся круге, можно создавать в теле шлифовального круга без его вращения путём нагружения равномерно распределённым давлением по поверхности посадочного отверстия. Для определения тангенциальных напряжений, в данном случае можно использовать формулу для расчёта на прочность толстостенных цилиндров, нагружаемых равномерно распределённым внутренним давлением [257, с. 283]:

$$\sigma_t = P_{\text{расп}} \frac{a^2}{b^2 - a^2}\left(1 + \frac{b^2}{r^2}\right), \tag{4.2}$$

где σ_t – тангенциальное напряжение в рассматриваемой точке круга; $P_{\text{расп}}$ – давление, равномерно распределённое по поверхности посадочного отверстия круча; b – наружный радиус круга; a – радиус посадочного отверстия крута; r – радиус рассматриваемой точки крута.

Предлагаемый способ позволяет проводить испытания шлифовальных кругов как согласно требованиям ГОСТ, т.е. с превышением рабочих нагрузок на определённую величину и выдержкой во времени, так и с целью нахождения предела прочности кругов, т.е. путём увеличения нагрузки до тех пор, пока не произойдёт разрушение круга. Способ даёт возможность использовать для испытания шлифовальных кругов на механическую прочность простые и разнообразные по конструкции устройства, такие, например, где рабочий орган выполнен в виде разрезной втулки, в виде разжимной цанги, в виде гибкого элемента – трубки, в которой создают давление с помощью жидкостей или газов.

Для реализации данного способа на практике подходят стенды для проведения испытаний на сжатие или какое-либо механическое, прессовое, гидравлическое, пневматическое оборудование, обеспечивающее создание необходимых для испытаний нагрузок и их контроль. В данной работе для этих целей использована установка FP-10 (рисунок 4.3, *а*), предназначенная для испытаний на растяжение и сжатие, а в качестве рабочего органа использовано устройство, конструкция которого изображена на рисунке 4.3, *б*.



а) *б)*

Рисунок 4.3 – Установка для проведения испытаний на растяжение-сжатие (*а*) и конструкция устройства (*б*) для статического испытания шлифовальных кругов на механическую прочность

В устройстве: *1* – стальная разрезная втулка, которая состоит из восьми сегментов и в собранном состоянии удерживается резиновым эластичным кольцом *2*. С обеих сторон втулка имеет внутренние конические поверхности, в которые помещаются стальные шарики *3*. Материал разрезной втулки *1* и шариков *3* – сталь ШХ15, подвергнутая закалке. При приложении к шарикам сжимающей нагрузки происходит разжим втулки и шлифовальный круг *6* нагружается по посадочному отверстию равномерно распределенным давлением, причём это давление прямо пропорционально приложенной нагрузке. На разрезной втулке *1* выполнен буртик, на который устанавливают испытываемый шлифовальный круг *6*. Усилие сжатия передается на шарики *3* упорами *4*, которые контактируют с установочными планшайбами *5*. Поверхность контакта упоров *4* с планшайбами *5* имеет конусообразную форму для устранения перекоса оси во время испытания шлифовальных кругов. Планшайбы 5 крепятся в зажимах,

которые располагаются в испытательном пространстве установки FP-10.

Испытания с помощью устройства проводили следующим образом. Шлифовальный круг устанавливали на разрезную втулку *1*, которую вместе со шлифовальным кругом помещали в устройство, как показано на рисунке 4.3, *б* и далее – на установку FP-10. Затем круг нагружали по поверхности посадочного отверстия равномерно распределенным давлением путём передачи сжимающей нагрузки на шарики *3* через упоры *4* и планшайбы *5*. Величину сжимающей нагрузки контролировали с помощью динамометра и записывающего устройства. Под действием испытательной нагрузки круг выдерживали необходимое время, а затем снимали его с разрезной втулки либо удаляли его осколки. Для определения предела прочности шлифовальных кругов их нагружали постепенно возрастающей нагрузкой, до наступления момента разрушения.

Предлагаемый способ позволяет значительно снизить затраты на испытания шлифовальных кругов на механическую прочность вследствие того, что статическое нагружение требует меньших энергозатрат, чем вращение кругов на больших скоростях. Кроме того, для реализации предлагаемого способа можно использовать конструктивно менее сложное и дорогостоящее оборудование, чем специальные испытательные станки. Так, например, для испытания шлифовальных кругов на механическую прочность в производственных условиях изготовлен и опробован стенд на базе гидравлического домкрата. Здесь использовано то же устройство, что и в предыдущем случае (рисунок 4.3, *б*). Данное устройство с испытываемым шлифовальным кругом устанавливалось между штоком домкрата и неподвижным упором (хоботом поперечно-строгального станка). Контроль приложения необходимых испытательных нагрузок осуществлялся посредством манометра, встроенного в рабочий контур гидроцилиндра домкрата через штатное сливное отверстие.

Также для испытаний предложенным способом использована установка на растяжение-сжатие упрощенной конструкции модели МСМ (рисунок 4.4) в которой для создания прилагаемого усилия также применяется гидравлический домкрат и чье устройство принципиально подобно описанному выше стенду.



Рисунок 4.4 – Установка для испытаний на растяжение-сжатие модели МСМ с приводом от гидравлического домкрата и установленным устройством для статического испытания шлифовальных кругов на механическую прочность

Следует отметить, что в случае разрыва кругов при испытании предлагаемым способом их осколки не имеют той, весьма значительной, кинетической энергии, которая возникает при вращении. Таким образом, снижается фактор травмоопасности при испытаниях, а также отпадает необходимость использования бронированных металлических испытательных камер вместо которых достаточно применять легкие прозрачные ограждения, например, из оргстекла.

Для вычисления величины давления, необходимого для испытания шлифовальных кругов предлагаемым способом, исходя из требуемой испытательной скорости круга, необходимо приравнять выражения (4.1) и (4.2). В результате получаем формулу для вычисления равномерно распределённого по поверхности посадочного отверстия крута давления ($P_{\text{расп}}$) действие которого со-

здаёт и теле шлифовального круга тангенциальные растягивающие напряжения, аналогичные тангенциальным напряжениям, возникающим при определённой скорости (*V*) вращения шлифовального круга:

$$P_{\text{расп}} = 0{,}1\gamma \frac{V^2}{4gb^2} \frac{(b^2 - a^2)}{(b^2 + a^2)} \left\{ b^2(3+\mu) + a^2(1-\mu) \right\}. \qquad (4.3)$$

Для расчётов по данной формуле плотность кругов можно определить, измерив их габаритные размеры и массу. Величину испытательной скорости следует выбирать в соответствии с требованиями нормативно-технической документации (например, из ГОСТ 12.3.028–82, ГОСТ Р 52588–2011). Коэффициент Пуассона можно найти из справочной литературы [89]. После этого вычисляется искомое испытательное давление и проводятся испытания на прочность. При разрушении шлифовального круга в процессе испытаний новым способом скорость, которой соответствует полученная величина разрывного давления, несложно вычислить, представив формулу (4.3) в несколько ином виде:

$$V = \sqrt{\frac{4P_{\text{расп}}gb^2}{0{,}1\gamma} \frac{(b^2 + a^2)}{(b^2 - a^2)\left\{b^2(3+\mu) + b^2(1-\mu)\right\}}}. \qquad (4.4)$$

В случаях, когда при испытаниях шлифовальных кругов предлагаемым способом контролируемым параметром на испытательном оборудовании является не непосредственно давление, равномерно распределённое по поверхности посадочного отверстия круга, а прямо пропорциональная ему сжимающая нагрузка, то для расчётов можно использовать следующую зависимость давления и сжимающей нагрузки:

$$P_{\text{расп}} = k \frac{F}{S}, \qquad (4.5)$$

где *F* – прилагаемая сжимающая нагрузка; *S* – площадь поверхности посадочного отверстия крута; *k* – коэффициент трансформации сжимающей нагрузки в нагрузку, действующую на поверхность посадочного отверстия круга (зависит от типа и характеристик применяемого для испытаний оборудования).

В данном случае сжимающее усилие передается через шарики на внутренние конические поверхности разрезной втулки и преобразуется в усилие,

равномерно распределенное по поверхности посадочного отверстия круга (рисунок 4.3, рисунок 4.4). Площадь контакта шариков и конических поверхностей минимальна, что позволяет не учитывать в расчетах силу трения и использовать формулу передачи усилия через идеальный односкосый клин. Соответственно, усилие, передаваемое на посадочное отверстие круга, для данного устройства рассчитывается через произведение сжимающего усилия на коэффициент трансформации *k*, равный котангенсу угла скоса клина.

При использовании на испытательном оборудовании гидравлического привода (например, домкрата) сжимающее усилие, передаваемое на устройство, рассчитывается через произведение показаний манометра испытательного стенда на площадь поперечного сечения приводного гидроцилиндра.

С целью проверки достоверности нового способа проведены сравнительные испытания шлифовальных кругов путём их разрушения методом вращения, а также предлагаемым способом. Испытания показали, что предлагаемый статический способ тестирования шлифовальных кругов на механическую прочность обладает достаточно высокой точностью, позволяет значительно снизить затраты на испытания, а также свести к минимуму фактор травмоопасности.\

При проведении испытаний выявлено еще одно преимущество предлагаемого способа. Он позволяет испытывать круги малого диаметра (в т.ч. устанавливать пределы их прочности путем разрушения), испытания которых динамическим методом не представляются возможными ввиду чрезмерно высоких частот вращения, которые, например, не могут быть достигнуты на имеющемся динамическом испытательном оборудовании. В частности предлагаемым статическим методом можно испытывать и определять путем разрушения предел прочности кругов после их износа до предельного диаметра (например, на 2/3 от исходного диаметра) и снятия их с эксплуатации, что позволяет более точно оценить прочность шлифовальных инструментов различных поставщиков.

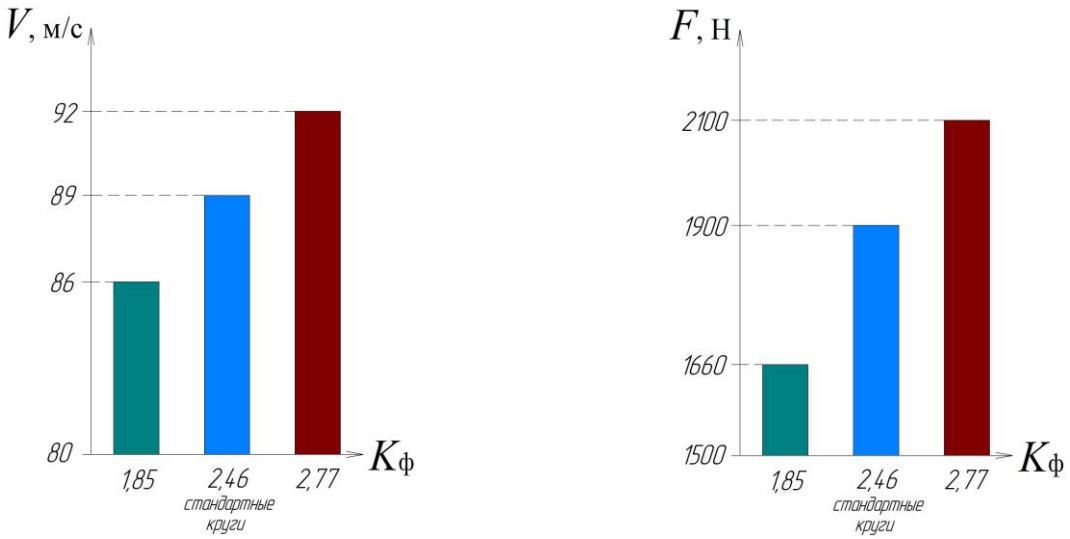
Основная часть прочностных испытаний опытных и стандартных отрезных кругов, выполненных в рамках данной работы, сделана (или продублирована) на основе предлагаемого способа.

4.4 Результаты оценки прочности шлифовальных кругов с заданной формой зёрен

Для изучения влияния формы зёрен на разрывную прочность отрезных шлифовальных кругов на первом этапе изготовлены и испытаны инструменты, состоящие целиком из зёрен с контролируемой формой с характеристикой: Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B (230×3×32 13A63H [$K_ф$] СТ3 Б) [114]. Данные круги не имели упрочняющих элементов и предназначены для исследования влияния формы зёрен на прочность отрезных шлифовальных кругов в «чистом» виде, без воздействия дополнительных факторов. Для изготовления опытных кругов использовались зёрна нормального электрокорунда марки 13AF30 изометрической формы с объемным коэффициентом формы $K_ф$≈1,85, зёрна игольчато-пластинчатой формы с $K_ф$≈2,77 и, для сравнения, обычные несортированные по форме зёрна с $K_ф$≈2,46. Опытные шлифовальные круги изготовлены по технологии и на оборудовании, которые описаны в главе 3.

Прочностные испытания кругов проводили как динамическим методом путём доведения их до разрыва при постепенном увеличении скорости вращения, так и с помощью статического способа и устройства, описанных в предыдущем разделе, путём регистрации сжимающей нагрузки, при которой круги разрушались. Количество разрушенных кругов с каждой названной выше формой зёрен составляло не менее 4-х для каждого способа испытаний.

Усредненные результаты испытаний отрезных шлифовальных кругов динамическим и статическим методами отражены на рисунке 4.5, *а, б* [120, 136]. Пересчёт значений, полученных статическим способом (рисунок 4.5, *б*), по формулам (4.4) – (4.5) в скорости разрыва кругов и их сравнение с данными динамических испытаний (рисунок 4.5, *а)* показали высокую сходимость значений (максимальные отклонения ≤2%). Анализ результатов также показывает, что форма зёрен, находящихся в шлифовальном круге, заметно влияет на его прочность. При увеличении коэффициента формы зёрен с $K_ф$≈1,85 до $K_ф$≈2,77 скорость разрыва кругов повышается, в среднем, на 7%, с 86 до 92 м/с.



а) *б)*

Рисунок 4.5 – Влияние формы зёрен ($K_ф$) на разрывную скорость (V) и разрывную нагрузку (F) при испытании отрезных шлифовальных кругов динамическим ($а$) и статическим ($б$) способами

Наблюдаемое повышение прочности отрезных кругов за счёт изготовления их из зёрен с большими коэффициентами формы объясняется тем, что зёрна с такой формой, по сравнению с другими, имеют большую площадь поверхности (см. раздел 2.3). Как следствие – они обладают более обширной площадью контакта со связкой и более высокой прочностью соединения с ней. Фактор наличия острых краев и выступов у пластинчато-игольчатых зёрен, теоретически являющихся концентраторами напряжений, здесь (в шлифовальных инструментах на полимерной бакелитовой связке) отступает на второй план и преобладающей роли не играет ввиду характера адгезии зёрен и связки.

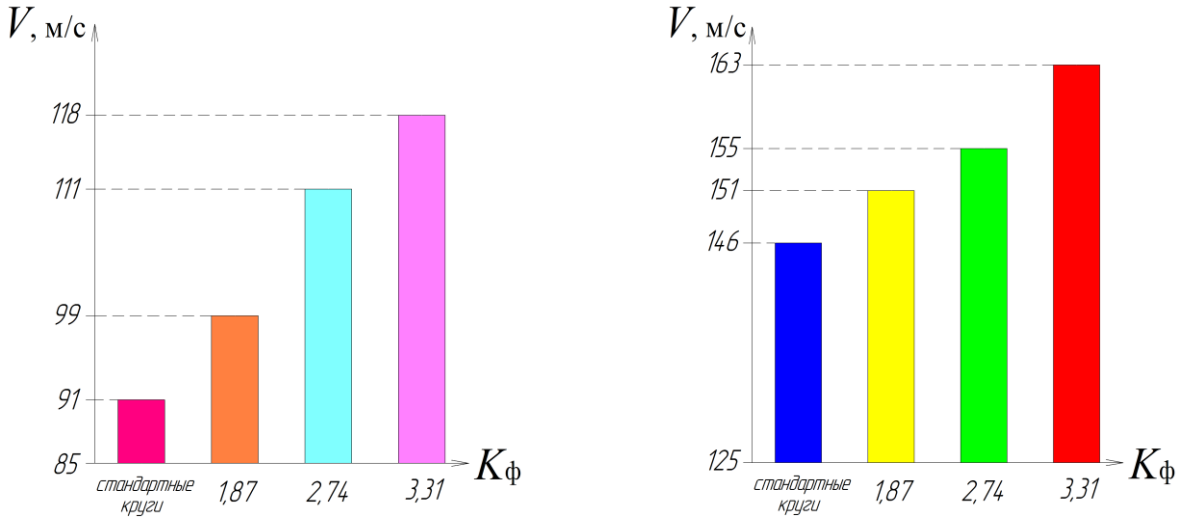
Сравнение данных, полученных динамическим и статическим способами показывает, что они, по своей сути, идентичны, т.е. статический способ даёт достоверные результаты и им можно пользоваться наравне с динамическим. При этом разница абсолютных значений результатов статических испытаний значительно больше разницы результатов динамических испытаний, поскольку тангенциальные растягивающие напряжения при статических испытаниях прямо пропорциональны действующей нагрузке, а при динамических испытаниях они пропорциональны скорости вращения круга, возведённой в квадрат.

Результаты, показывающие, что за счёт формы зёрен можно повысить прочность кругов, привели к мысли о том, что этот эффект может быть достигнут более экономно и улучшен – за счёт упрочнения зёрнами с контролируемой формой мелких зернистостей небольшой концентрической зоны вблизи посадочного отверстия круга. Для проверки этой гипотезы изготовлены две партии опытных отрезных шлифовальных кругов (см. главу 3) с характеристиками:

1) Тип 41 230×3×22 13AF30 / 53CF54 [$K_ф$] S B (230×3×22 13A63H / 53C32H [$K_ф$] Т2 Б), без упрочняющих сеток и втулок, у которых зона у посадочного отверстия (Ø100 мм) выполнена из зёрен карбида кремния черного 53CF54 с контролируемой формой ($K_ф$≈1,87; $K_ф$≈2,74; $K_ф$≈3,31), а остальная часть круга – из обычных несортированных зёрен электрокорунда 13AF30 ($K_ф$≈2,46);

2) Тип 41 230×3×22 13AF30 / 53CF54 [$K_ф$] S BF (230×3×22 13A63H / 53C32H [$K_ф$] Т2 БУ), отличающихся от разновидностей инструментов из первой партии наличием упрочняющих сеток и втулок.

Кроме того, в обоих случаях в качестве сравнительного эталона изготовлены шлифовальные круги, целиком состоящие из обычных зёрен нормального электрокорунда 13AF30 ($K_ф$≈2,46), не упорядоченных по форме. Результаты прочностных испытаний опытных кругов представлены на рисунке 4.6, *а*, *б*.



а) *б)*

Рисунок 4.6 – Скорость разрыва (V) отрезных шлифовальных кругов без армирующих (*а*) и с армирующими (*б*) элементами и зоной упрочнения из зёрен с контролируемой формой ($K_ф$)

Анализ полученных данных показывает, что упрочнение зоны вблизи посадочного отверстия шлифовальных кругов путём применения зёрен мелких зернистостей с контролируемой формой обеспечивает более значительный эффект повышения прочности кругов, чем при их изготовлении целиком из упорядоченных по форме зёрен.

Использование в зоне у посадочного отверстия кругов зёрен с контролируемой формой ($K_ф$≈1,87, $K_ф$≈2,74, $K_ф$≈3,31), по сравнению со стандартными кругами без упрочняющих элементов, имеющих среднюю разрывную скорость V = 91 м/с, даёт прирост разрывной скорости, соответственно, на 8 м/с, 20 м/с и 27 м/с, т. е. увеличение на 9%, 22% и 30%.

Для кругов с армирующими сетками и втулками эффект упрочнения от применения зёрен с контролируемой формой несколько меньше. При средней разрывной скорости стандартных кругов V = 146 м/с, прирост этого параметра при использовании зёрен с упомянутыми выше коэффициентами формы составляет, соответственно, 5 м/с, 9 м/с и 17 м/с, т.е. разрывная скорость повышается на 3%, 6% и 12%;

Более значительное повышение прочности у кругов без упрочняющих элементов (до 30%), по сравнению с кругами, имеющими эти элементы (до 12%), связано, видимо, с тем, что сетки (в особенности) и втулки, как сильный воздействующий фактор (дающий повышение скорости на стандартных кругах до 60%) взаимодействуют с другими факторами упрочнения нелинейно.

Пересчет на основе имеющихся данных по скоростям разрыва кругов (рисунок 4.6) через коэффициент запаса прочности (равный для отрезных кругов $K_{зп}$=1,8) позволил получить абсолютные величины максимально допустимых рабочих скоростей для шлифовальных кругов с зоной упрочнения из зёрен с контролируемой формой, т.е. величины скоростей, которые рекомендуют для работы и указывают в характеристиках инструментов. Максимально допустимые рабочие скорости шлифовальных кругов с контролируемой формой зерен в зоне у посадочного отверстия с упрочняющими и без упрочняющих элементов представлены в виде диаграмм на рисунке 4.7.

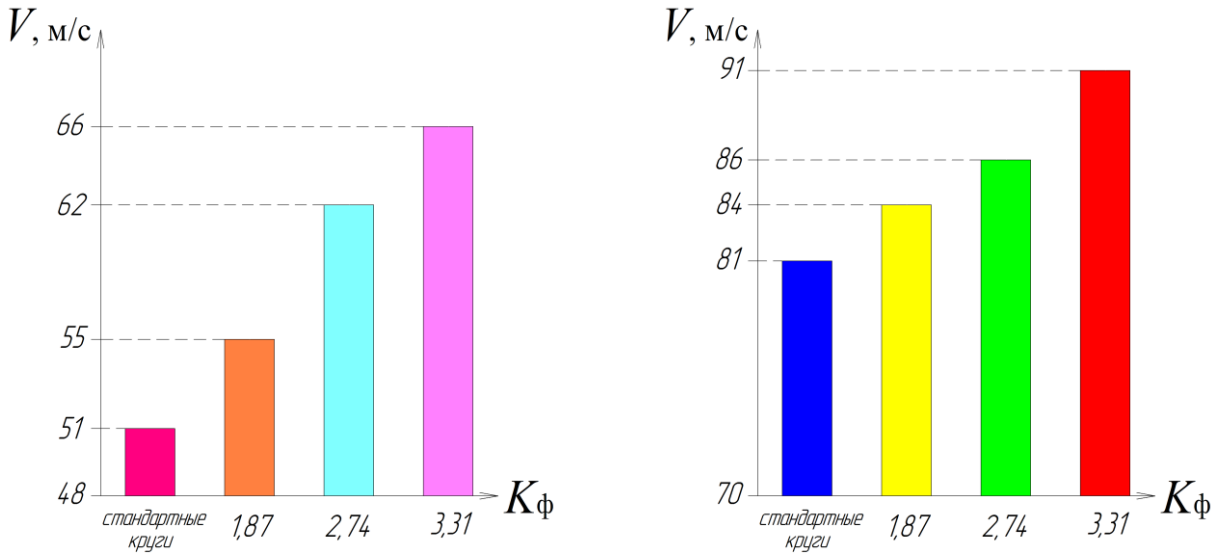


Рисунок 4.7 – Величины рабочих скоростей (V) отрезных шлифовальных кругов с зоной упрочнения из зёрен с контролируемой формой ($K_ф$) без армирующих (*а*) и с армирующими (*б*) элементами

Из диаграмм следует, что вводя зёрна с контролируемой формой в зону посадочного отверстия шлифовальных кругов на бакелитовой связке можно повысить их рабочую скорость на 10 м/с (для кругов с армирующими элементами) и на 15 м/с (для кругов без армирующих элементов), т.е. увеличить её с 80 м/с до 90 м/с и с 50 м/с до 65 м/с, соответственно. Это открывает перспективы повышения эффективности операций шлифования по ряду показателей.

4.5 Выводы по главе 4

1. Произведен анализ динамических и статических методов оценки прочности шлифовальных кругов. Динамические методы испытания характеризуются достоверностью и надежностью получаемых результатов, но требуют применения дорогостоящих высокоскоростных испытательных станков. Статические методы проще в реализации, но не имеют широкого применения из-за своей недоработанности, необходимости изготовления и испытания образцов-свидетелей (брусков, восьмерок) вместе со шлифовальными кругами, или из

них, сложности экстраполяции результатов прочностных испытаний образцов на реальный инструмент.

2. Для динамического испытания шлифовальных кругов на прочность разработан и изготовлен испытательный стенд в виде модульной съёмной конструкции на базе универсально-заточного станка модели 3А64Д с регулируемым электроприводом, который позволяет бесступенчато регулировать скорость вращения шпинделя в бронекамере в пределах 800÷18500 об/мин и испытывать на прочность шлифовальные круги прямого профиля с максимальным диаметром 356 мм и высотой до 10÷30 мм в зависимости от диаметра. На стенде испытаны партии экспериментальных отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен с упрочняющими элементами и без них.

3. Разработан статический способ оценки прочности непосредственно шлифовальных кругов, основанный на идентичности характера распределения тангенциальных напряжений во вращающихся дискообразных объектах и толстостенных цилиндрах, нагружаемых внутренним давлением. С учетом того, что разрушение шлифовальных кругов при вращении происходит именно от действия тангенциальных напряжений, удалось создать их воздействие путём нагружения посадочных отверстий кругов равномерно распределенным давлением. Математически описана взаимосвязь скорости вращения шлифовального круга с соответствующим по воздействию на напряженное состояние круга равномерно распределенным по посадочному отверстию круга давлением (4.1÷4.4). Для реализации предлагаемого способа изготовлено приспособление, центральным элементом которого является разрезная втулка, с помощью сегментов которой усилие сжатия преобразуется в распределенное давление, прикладываемое к посадочному отверстию круга. Математически описана взаимосвязь усилия сжатия и создаваемого им давления (4.5).

4. Сравнительные испытания шлифовальных кругов путём их разрушения динамическим методом (вращением) и предложенным статическим способом, а также их анализ, демонстрируют высокую сходимость результатов. На способ получен патент на изобретение (Пат. 2292032 РФ) [211] и с его помощью сде-

лана (или продублирована) основная часть прочностных испытаний опытных шлифовальных кругов в данной работе. Предложенный способ позволяет применяя универсальное оборудование и несложные устройства испытывать шлифовальные круги практически любых диаметров, в т.ч. малых, для испытания которых динамическим методом необходимо наличие специализированных дорогостоящих высокоскоростных испытательных стендов. Способ позволяет проводить как неразрушающий контроль прочности кругов перед эксплуатацией, так и определять пределы их прочности путем разрушения от постепенно возрастающей нагрузки.

5. Изготовлены и испытаны на прочность отрезные шлифовальные круги на бакелитовой связке, целиком состоящие из зёрен нормального электрокорунда 13AF30 с контролируемой формой ($K_ф$≈1,85, $K_ф$≈2,46, $K_ф$≈2,77). Установлено, что при увеличении коэффициента формы зёрен с $K_ф$≈1,85 до $K_ф$≈2,77 скорость разрыва кругов повышается, в среднем, на 7%, с 86 до 92 м/с. Объясняется это тем, что с увеличением коэффициента формы зёрен увеличивается площадь их поверхности (см. раздел 2.3) и улучшается адгезия зёрен с полимерной бакелитовой связкой.

6. Изготовлены и испытаны на прочность отрезные шлифовальные круги на бакелитовой связке с упрочняющими стеклосетками и втулками и без них, у которых зона у посадочного отверстия (Ø100 мм) выполнена из зёрен карбида кремния черного марки 53CF54 с контролируемой формой ($K_ф$≈1,87; $K_ф$≈2,74; $K_ф$≈3,31), а остальная часть круга – из обычных несортированных по форме зёрен электрокорунда нормального 13AF30 ($K_ф$≈2,46). В качестве сравнительного эталона изготовлены и испытаны стандартные круги, целиком состоящие из зёрен электрокорунда 13AF30 ($K_ф$≈2,46). Установлено, что формирование у посадочного отверстия кругов зоны из зёрен с контролируемой формой мелких зернистостей даёт больший эффект упрочнения, по сравнению с кругами, изготовленными целиком из упорядоченных по форме зёрен.

7. Установлено, что использование в зоне у посадочного отверстия кругов без армирующих стеклосеток и втулок зёрен карбида кремния 53CF54 с кон-

тролируемой формой ($K_ф \approx 1{,}87$, $K_ф \approx 2{,}74$, $K_ф \approx 3{,}31$) дает прирост разрывной скорости кругов, соответственно, на 9%, 22% и 30%, т.е. на 8 м/с, 20 м/с и 27 м/с, по сравнению со стандартными кругами, имеющими среднюю скорость разрыва $V = 91$ м/с.

8. Установлено, что применение зёрен с контролируемой формой в зоне у посадочного отверстия шлифовальных кругов с армирующими элементами (сетками и втулками) дает несколько меньший, но также весьма ощутимый эффект. Использование здесь зёрен карбида кремния 53CF54 с контролируемой формой ($K_ф \approx 1{,}87$, $K_ф \approx 2{,}74$, $K_ф \approx 3{,}31$) дает прирост разрывной скорости, соответственно, на 3%, 6% и 12%, т.е. на 5 м/с, 9 м/с и 17 м/с, по сравнению со стандартными кругами, имеющими среднюю скорость разрыва $V = 146$ м/с.

9. Более значительное повышение прочности у отрезных кругов (до 30%) без армирующих элементов, по сравнению с кругами, имеющими эти элементы (до 12%), объясняется, очевидно, тем, что сетки (в особенности) и втулки, как сильный воздействующий фактор, несколько сглаживают влияние других и отрицательных и положительных факторов и вступают с ними в нелинейное взаимодействие.

10. Полученные результаты прочностных испытаний позволили установить (через коэффициент запаса прочности $K_{зп}$=1,8), что создание у посадочного отверстия отрезных шлифовальных кругов на бакелитовой связке зоны из зёрен с контролируемой пластинчато-игольчатой формой, повышает их рабочую скорость на 10÷15 м/с, а именно увеличивает максимально допустимую рабочую скорость шлифовальных кругов с упрочняющими элементами с 80 м/с до 90 м/с и кругов без упрочняющих элементов с 50 м/с до 65 м/с. Повышение прочности и рабочей скорости шлифовальных кругов открывает перспективу повышения эффективности операций шлифования по ряду показателей, таких, как производительность обработки, шероховатость шлифуемых поверхностей, стойкость инструментов и др. (п. 5.4).

Глава 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ЗЁРЕН НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ

5.1 Методика, оборудование и материалы для проведения испытаний опытных шлифовальных кругов

5.1.1 Методика проведения испытаний и обработка опытных данных

Изучение литературных данных говорит о том, что в число важных эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов входят: режущая способность (производительность шлифования), износ (расход), мощность, потребляемая на резание, качество отрезки заготовок, разброс по твёрдости и структуре, соответствие по размерам, неуравновешенность, допустимая рабочая скорость и пр. Для оценки этих показателей, на практике используют как стандартные, так и оригинальные методики [3, 4, 5, 89, 97, 180].

Анализ показывает, что тестирование отрезных кругов согласно методике, содержащейся в ГОСТ Р 57978–2017 [55] и ГОСТ 21963-2002 [54], носит упрощенный характер и годится, главным образом, для производственных целей. Более тонкие исследования требуют более обширной и точно подобранной информации относительно условий проведения испытаний. Поэтому, в данной работе для проведения сравнительных испытаний опытных отрезных шлифовальных кругов приняты две схемы резания – с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу и с постоянной подачей круга (круглое врезное шлифование). Выбор одновременно двух схем резания (что требует проведения в два раза большего объёма экспериментов) вызван реализацией перспективы по оценке эксплуатационные показатели опытных инструментов в различных условиях. Кроме того, схема шлифования с постоянной подачей круга относительно редко используется на операциях отрезки. Она более характерна для операций круглого и плоского шлифования, что даёт возможность экстраполировать полученные результаты и выводы на широкий спектр операций шлифования. В

качестве контролируемых эксплуатационных показателей при испытаниях кругов были выбраны следующие параметры.

1. Режущая способность (Q_m) (производительность шлифования), определяемая как отношение массы снятого материала заготовки ($_{\Delta}M_з$) ко времени обработки (t): $$Q_m = {}_{\Delta}M_з / t; \quad (г/мин) \qquad (5.1)$$

2. Коэффициент шлифования ($K_ш$), вычисляемый как отношение массы снятого материала заготовки ($_{\Delta}M_з$) к израсходованной массе круга ($_{\Delta}M_к$):

$$K_ш = {}_{\Delta}M_з /{}_{\Delta}M_к; \qquad (5.2)$$

3. Эффективная мощность резания ($W_{эф}$), характеризующая уровень энергозатрат при работе шлифовального круга и выражаемая через разницу мощностей рабочего ($W_{рх}$) и холостого ходов ($W_{хх}$):

$$W_{эф} = W_{рх} - W_{хх}; \quad (Вт) \qquad (5.3)$$

4. Качество обработки заготовок, оцениваемое по теплонапряжённости этого процесса, по изменению микротвёрдости и микроструктуры металла вблизи плоскости отрезки, а также по шероховатости поверхностей.

При выборе последнего показателя учитывались следующие соображения. Качество обработанных поверхностей при отрезном шлифовании непосредственно связано с теплонапряжённостью процесса резания. Интенсивный нагрев заготовок в зоне резания может вызывать прижоги, визуально проявляющиеся, например, в виде цветов побежалости. Сильный прижог обычно сопровождается структурными изменениями металла и, как следствие, – ухудшением ряда физико-механических свойств детали вблизи зоны резания. В частности, в число возможных дефектов от воздействия высоких температур входят значительное снижение микротвёрдости металла и образование шлифовочных трещин на его поверхности. Для выявления таких дефектов при отрезном шлифовании необходимо контролировать температуру в зоне резания, микротвёрдость вблизи плоскости резания, а также проводить металлографические исследования структуры обработанного металла. Оценка шероховатости сформированных в процессе отрезки поверхностей заготовок позволяет оценить влияние геометрии зёрен на этот параметр и экстраполировать полученные результаты и

выводы на операции шлифования, где шероховатость обработанных поверхностей является одним из приоритетных показателей качества шлифования (круглое, плоское, заточное шлифование и др.).

В связи с тем, что в нормативной документации по тестированию отрезных шлифовальных кругов (ГОСТ 21963-2002) фактически регламентируется только тип заготовки (труба 21,3×2,8 из стали 10), перед проведением сравнительных испытаний осуществлён литературный анализ, а также изучена практика проведения подобных испытаний на реальном производстве. Так, в ходе прохождения стажировки на предприятии-изготовителе отрезных шлифовальных кругов «Rottluff» (Германия) были собраны данные о том, что для установления среднего коэффициента шлифования партии отрезных кругов с наружным диаметром 230 мм здесь испытывается 10 кругов, при этом каждым кругом осуществляется 25 резов заготовки. В качестве заготовки используется труба из конструкционной стали (St. 37). После каждых пяти резов шлифовальный круг снимают со шпинделя и измеряют его диаметр по четырём точкам. Данные о габаритных размерах, а также плотностях круга и заготовки позволяют рассчитывать коэффициент шлифования по объёму срезаемого металла и износа круга. Испытания проводятся рабочим-оператором на ручной угловой шлифовальной машинке, а возможная нестабильность результатов компенсируется значительным числом испытываемых кругов и числом резов.

В то же время, по данным Шоу М. [275, 313] для случая, когда испытания отрезных кругов проводятся на стационарном оборудовании при неизменных режимах резания, для определения средних эксплуатационных показателей партии отрезных шлифовальных кругов достаточно испытать 2÷3 круга 10-ю резами каждый. По тем же данным, при поиске оптимальных режимов резания считается достаточным производить на каждом режиме по 5 резов, после чего осуществлять измерения и расчёты.

На основе этой информации принято решение для каждой разновидности опытных инструментов с определённым коэффициентом формы или углом ориентации шлифовальных зёрен и для обычных инструментов (как сравни-

тельного эталона) проводить испытания на 2-х кругах по каждой марке стали, осуществляя каждым кругом по 25 резов. При этом перед началом испытаний и после каждых 5 резов измерялась масса круга, масса заготовки и отрезанных от неё частей, что, при известном времени резания, позволяло определять режущую способность и коэффициент шлифования круга для данных 5 резов. Такой подход позволил для каждого типа кругов формировать массив статистических данных, достаточных для достоверной оценки их работоспособности. При поиске рациональных режимов резания, а именно, – усилия прижатия заготовки к кругу (либо подачи круга) и его рабочей скорости, проводились испытания на двух обычных кругах. Каждым кругом дважды осуществлялось по 5 резов последовательно на всех исследуемых режимах резания. После циклов из 5 резов здесь дополнительно к измерению масса круга и заготовки оценивался наружный диаметр круга по четырём точкам. По этим замерам определялась режущая способность и коэффициент шлифования испытуемых кругов, а также их радиальное биение (неравномерность диаметра). При испытании отрезных кругов повышенной прочности на различных рабочих скоростях тестировалось четыре круга, причём на каждой скорости одним кругом производилось по 5 резов.

Сформированный массив опытных данных служил базой для построения математических зависимостей. При этом в процессе построения математических моделей использовался пакет прикладных программ «Excel» и «Statistica», позволявший описывать полученные данные в виде линейных, экспоненциальных, степенных и логарифмических зависимостей. Полученные модели сравнивались между собой и в качестве рабочей выбиралась модель с наибольшим коэффициентом корреляции. Кроме того, проводилась оценка адекватности моделей, рассчитывалась их средняя относительная ошибка и производилась проверка по критерию Фишера, для чего по описанной методике, выбранных режимах резаниях и заготовках испытывалось дополнительно по одному кругу с определённым коэффициентом формы или углом ориентации шлифовальных зёрен из параллельной производственной партии.

Следует также отметить, что режущая способность опытных кругов контролировалась как при сравнительных испытаниях с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу, так и с постоянной подачей круга. Обусловлено это тем, что при отрезке труб по схеме круглого врезного шлифования слои металла на внутренней их поверхности деформируются и проминаются кругом перед окончательной отрезкой заготовки, что увеличивает машинное время. Величины деформаций и время обработки при работе кругов с различными характеристиками различаются.

5.1.2 Оборудование и заготовки для проведения испытаний

Для проведения экспериментов при схеме резания с постоянной подачей круга использован испытательный комплекс на базе универсально-заточного станка модели 3А64Д (рисунок 5.1). В нём, с целью расширения технологических возможностей станка и проведения испытаний шлифовальных кругов на различных скоростях, вместо штатного асинхронного электродвигателя применён двигатель постоянного тока мощностью 2,2 кВт, запитываемый через тиристорный привод.

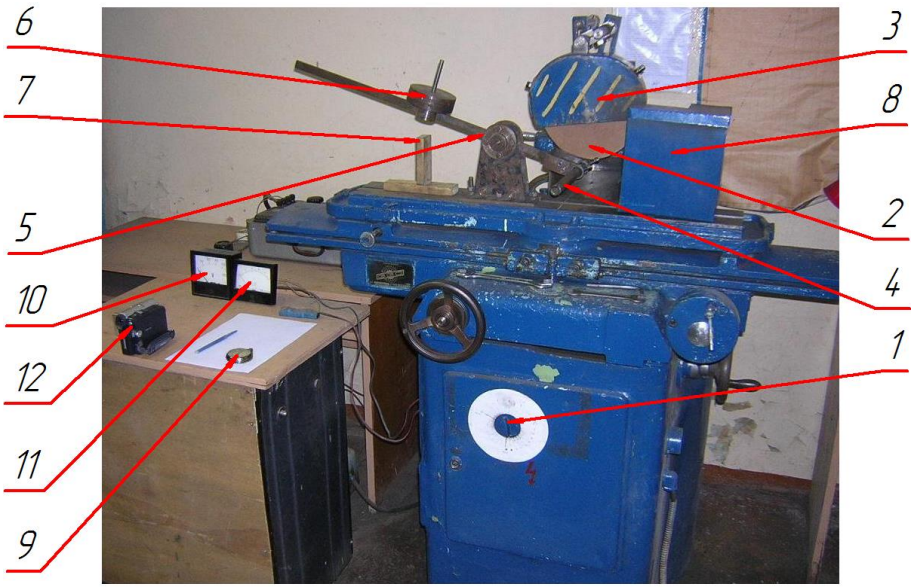


Рисунок 5.1 – Испытательный комплекс на базе станка модели 3А64Д для оценки работоспособности отрезных шлифовальных кругов при схеме резания с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу

Электродвигатель подключен по схеме смешанного возбуждения, а регулирование скорости его вращения осуществляется при помощи переменного резистора *R* (позиция *1*, рисунок 5.1), поворотом которого изменяется напряжение в цепи якоря. Тиристорный привод позволяет плавно регулировать скорость вращения шпинделя станка в пределах 350÷7600 об/мин.

В ходе экспериментов испытуемый шлифовальный круг *2* устанавливался на шпиндель станка и закрывался защитным кожухом *3*. Заготовка *4* устанавливалась в захваты рычажно-балансирного устройства *5* и прижималась к шлифовальному кругу с постоянным усилием, регулируемым посредством грузов *6*. При этом упор *7* ограничивал ход рычага балансира после разрезки заготовки, бункер *8* служил для сбора продуктов шлифования, а секундомер *9* (с ценой деления 0,2 с) – для контроля времени резания.

Вольтметр *10* и амперметр *11* встроены в цепь якоря электродвигателя станка и использованы для оценки мощности резания. Для точного определения мощности резания показания вольтметра и амперметра записывались в процессе испытаний цифровой видеокамерой *12*. Анализ видеозаписей позволял с высокой точностью определять мощности холостого и рабочего ходов, эффективную мощность резания, а также уточнять время резания. Для расчёта полных затрат электроэнергии также измерялась мощность, расходуемая на обмотке возбуждения электродвигателя.

Настройка и контроль скорости вращения шпинделя станка осуществлялись по показаниям вольтметра и предварительно построенным тарировочным графикам зависимости «скорость вращения шпинделя – напряжение в цепи якоря». Данная зависимость, имеющая линейный характер, определена при помощи механического тахометра (модель СК тип 751) с пределом измерения 10000 об/мин и ценой деления 10 об/мин, в результате многократных замеров скорости шпинделя с установленным на нём отрезным кругом при разных напряжениях на якоре электродвигателя.

Кроме того, для испытания высокоскоростных кругов на рабочий стол станка 3А64Д устанавливался быстросъёмного испытательный модуль (шпин-

дельный узел), соединяемый со шпинделем станка клиноременной передачей, за счёт которой обеспечивалась частота вращения испытуемых инструментов в пределах 800÷18500 об/мин [150, 155].

Для проведения испытаний опытных отрезных кругов по схеме круглого врезного шлифования (с постоянной подачей круга) использован испытательный стенд на базе токарно-винторезного станка модели 1К62 с установленным съёмным модулем для круглого шлифования с приводом от угловой шлифовальной машинки (рисунок 5.2) [148, 152]



Рисунок 5.2 – Стенд на базе токарного станка с установленным модулем для испытания отрезных кругов по схеме круглого врезного шлифования

Модуль включает шпиндельный узел с защитным кожухом для кругов с приводом от УШМ мощностью 2 кВт, которые соединены посредством пальцевой муфты и закреплены на Г-образной опорной плите. Регулирование частоты вращения шлифовального шпинделя осуществляется регулятором напряжения (диммером), встроенным в цепь приводной УШМ, за счет которого обеспечивается регулирование частоты вращения кругов в пределах 3350÷6640 об/мин. Для оценки эффективной мощности резания при испытаниях служит амперметр, встроенный в цепь УШМ. Частота вращения заготовки и величина подачи круга регулируются коробками скоростей и подач токарного станка.

В качестве базовой заготовки при проведении всех испытаний использовалась трубы 21,3×2,8 из стали 10, с длиной фрагментов 300 мм. Для проведе-

ния испытаний отрезных кругов с заданной ориентацией шлифовальных зёрен также использовались трубы 20×2 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и трубы 20×2 из стали ШХ15, закалённые в масле на твёрдость 60 HRC. Такой выбор заготовок обусловлен стремлением испытать опытные круги на сталях из разных групп, отличающихся по химическому составу и по типу кристаллической структуры, с тем, чтобы формировалась возможность экстраполировать полученные результаты и выводы на максимально широкий круг обрабатываемых материалов. В этом контексте следует отметить, что сталь 10 имеет феррито-перлитную структуру, сталь 12Х18Н10Т – аустенитную, сталь ШХ15 (60 HRC) – мартенситную. Массы кругов и обрабатываемых заготовок находились в пределах 200÷400 г, что позволяло измерять их на электронных квадрантных весах модели ВЛКТ-500г-М с пределом измерения 500 г и ценой деления 0,01 г.

Для определения температуры в районе зоны резания при проведении испытаний опытных отрезных шлифовальных кругов использовался способ, основанный на анализе цветов побежалости, возникающих при нагреве на поверхности металла. Данный подход выбран в связи с тем, что в тонкостенной трубе технически сложно расположить какое-либо измерительное устройство, например – искусственную термопару. Кроме того, несмотря на относительно невысокую точность, способ определения температуры по цветам побежалости даёт наглядное представление о глубине зоны термического влияния в продольном и поперечном направлениях относительно плоскости резания.

Для реализации данного способа трубы, предназначенные для испытаний, предварительно фрезеровались по наружной поверхности на глубину 0,25 мм, в результате чего формировались лыски характерного металлического цвета, без коррозионной плёнки, шириной 6 мм, необходимые для фиксации цветов побежалости на чистой поверхности металла. Трубы из стали ШХ15 фрезеровались перед их закалкой, после которой фрезерованная поверхность шлифовалась шкуркой (из абразива 13А F240 (4Н) до получения равномерного металлического цвета. Оценка температуры по цветам побежалости производилась при схеме разрезки заготовок с постоянным усилием их прижатия к инструменту.

Трубы при испытаниях располагали относительно шлифовального круга таким образом, чтобы поверхность лысок разрезалась в последнюю очередь, т.е. находилась внизу, в горизонтальной плоскости, где формируется наиболее теплонапряжённая зона. Здесь максимально сказывается фактор накопления тепла от ранее срезанных слоёв металла, в связи с чем, в данном месте на заготовке образуется характерная зона термического влияния с цветами побежалости.

Размеры зоны термического влияния оценивались путём анализа изображений фрезерованных лысок после их сканирования с разрешением 1200 dpi, цветностью 24 разряда и автоматическими настройками оптической чёткости. Последующая обработка изображений в графическом редакторе «Paint» позволяла определять с помощью каталогов цветов побежалости характерные температурные зоны в зависимости от их удаления от плоскости отрезки. На основе полученных данных строились графики температуры нагрева металла на различном удалении от плоскости отрезки при работе кругами разных типов.

Для оценки влияния температуры резания на изменения в структуре и твёрдости обрабатываемого металла проводились дополнительные исследования. В частности, оценивалась микротвёрдость металла вблизи зоны резания. Плоская поверхность фрезерованных лысок на наружной поверхности труб служила основой для получения шлифов. Исследования микротвёрдости проводились на приборе ПМТ-3. Здесь на каждом образце первые два измерения производились на удалении 0,05 и 0,1 мм от края реза, а последующие осуществлялись через 0,1 мм на максимальное удаление 1,0 мм. Кроме того, изучалась микроструктура образцов, для чего шлифы предварительно подвергали травлению. Исследования проводились на микроскопе ЛОМО МЕТАМ Р-1.

Изучение влияния геометрии зёрен на шероховатость обработанных поверхностей производилось на торцевых поверхностях заготовок разрезанных при схеме круглого врезного шлифования (т.е. с постоянной подачей инструмента). Обусловлено это тем, что шероховатость обработанных поверхностей является одним из основных показателей качества шлифования при схемах обработки с постоянной величиной подачи инструмента (или заготовки), напри-

мер, при круглом, плоском или заточном шлифовании. При проведении исследований оценивался параметр шероховатости R_a. Измерения производились на профилографе-профилометре «Talysurf 5-120» фирмы «Taylor-Hobson».

При проведении исследований для каждого коэффициента формы зёрен (или угла их ориентации в круге) использовалось по 4 заготовки, разрезанных опытными инструментами. При этом, на каждой заготовке снималось по 12 измерений на участках торцевых поверхностей, равномерно распределённых по окружности разрезанных труб через 30°. Шероховатость во всех случаях измерялась на торцевых поверхностях тех частей заготовок, которые после отрезки оставались закреплёнными в патроне станка. Мотивировано это тем, что отрезаемая часть заготовки испытывает вибрации, величины которых увеличиваются по мере углубления шлифовального круга в заготовку, что отрицательно сказывается на шероховатости обрабатываемых поверхностей [148].

Полученный массив экспериментальных данных позволил оценить разброс шероховатости на заготовках и выявить зависимости влияния факторов формы и ориентации зёрен в шлифовальных кругах на шероховатость обрабатываемых ими поверхностей.

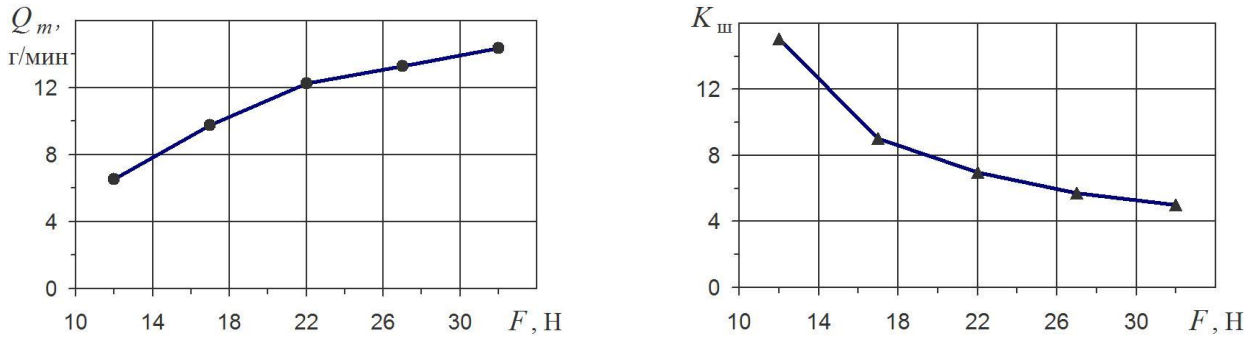
5.2 Исследование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов из зёрен 13AF30 с заданной формой при различных схемах обработки

В данном разделе описаны исследования эксплуатационных показателей опытных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с (230×3×32 13A63H [$K_ф$] СТ3 Б В 50 м/с), целиком изготовленных из зёрен с контролируемой формой [106]. Для проведения исследований были изготовлены круги из зёрен нормального электрокорунда 13AF30 изометрической формы ($K_ф$≈1,85) и круги из зёрен игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈2,77). Кроме того в качестве сравнительного эталона изготовлены круги из исходных зёрен, не подвергнутых сепарации по форме ($K_ф$≈2,46). Технология и оборудование для изготовления опытных кругов описаны в главе 3.

В работе [96] впервые показано влияния формы зёрен на эксплуатационные показатели отрезных кругов с упрочняющими элементами. В продолжение этих исследований здесь изучена работоспособность отрезных кругов с контролируемой формой зёрен с упрочняющими и без упрочняющих элементов, при различных схемах обработки, раскрыто влияние формы зёрен на качество поверхностей заготовок, обработанных такими кругами, – исследована микротвёрдость и микроструктура заготовок, а также шероховатость поверхностей.

5.2.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности кругов из зёрен 13AF30 с заданной формой

Режимы резания при испытаниях по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу определялись при испытании опытных отрезных кругов из несортированных зёрен путём нахождения рационального усилия прижатия заготовки к кругу и рациональной рабочей скорости. Для решения этой задачи усилие прижатия заготовки к кругу дискретно изменялось в пределах 12÷32 Н при помощи грузов, каждый массой 0,5 кг, которые последовательно устанавливались на рычаг балансира нагрузочного устройства. Испытания проводились с рабочей скоростью 50 м/с, на трубах 21,3×2,8 из стали 10. Полученные результаты отражены в виде зависимостей режущей способности и коэффициента шлифования отрезных кругов (рисунок 5.3, а, *б*) от усилия прижатия заготовки к кругу.

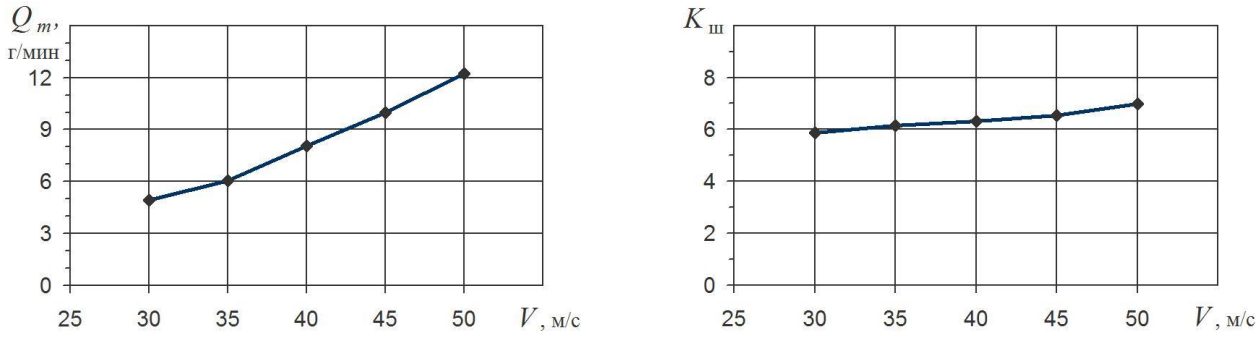


а) *б)*

Рисунок 5.3 – Зависимость режущей способности (*а*) и коэффициента шлифования (*б*) отрезных кругов от усилия прижатия заготовки к кругу

В ходе испытаний установлено, что при малых усилиях прижатия заготовки круг засаливался: при F =12 Н через 1÷2 реза, при F =17 Н через 4÷5 резов. В результате резание практически прекращалось, происходил нагрев заготовки до её покраснения, что вынуждало прерывать работу. Для возобновления резания требовалось удалять с круга засаленный слой путём его шабрения или резкого увеличения усилия прижатия. При усилиях прижатия более 22 Н происходил сильный и неравномерный износ кругов, появлялись и усиливались вибрации рычага с заготовкой. Все изложенное позволило констатировать, что в данном случае рациональное усилие составляет F =22 Н.

Далее осуществлялся поиск рациональной рабочей скорости круга (рисунок 5.4, *а, б*). Максимальная рабочая скорость испытываемых кругов, исходя из условия обеспечения их прочности (согласно ГОСТ 21963–2002), а также результатов прочностных испытаний (глава 4) составляет 50 м/с. Соответственно, рациональную рабочую скорость кругов искали в диапазоне 30÷50 м/с, путём дискретного её изменения. Все испытания проводились с усилием прижатия заготовок к кругам F =22 Н.



а) *б)*

Рисунок 5.4 – Зависимость режущей способности (*а*) и коэффициента шлифования (*б*) отрезных кругов от их рабочей скорости

Результаты, представленные в виде графиков зависимости режущей способности (рисунок 5.4, *а*) и коэффициента шлифования от рабочей скорости кругов (рисунок 5.4, *б*), говорят о том, что рациональной является максимальная рабочая скорость V=50 м/с. При данной рабочей скорости режущая способность кругов имеет максимальное, а износ – минимальное значение, т.е. дости-

гается наибольший коэффициент шлифования ($K_ш$). Результаты экспериментов по подбору скорости шлифования коррелируют с исследованиями ряда авторов [73, 164, 258], которые показывают, что при прочих равных условиях повышение рабочей скорости приводит к росту режущей способности круга и практически всегда снижает удельный износ кругов.

Режимы резания для отрезки по схеме круглого врезного шлифования были выбраны по результатам испытаний обычных кругов при различных частотах вращения заготовки и величинах подач кругов. Рациональная частота вращения шпинделя токарного станка с закреплённой заготовкой составляла 31,5 об/мин, а поперечная подача кругов 0,084 мм/об [148, 152].

Результаты оценки режущей способности отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с с контролируемой формой зёрен при эксплуатации по схеме резания с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу и по схеме круглого врезного шлифования представлены в виде диаграмм на рисунке 5.5 и рисунке 5.6.

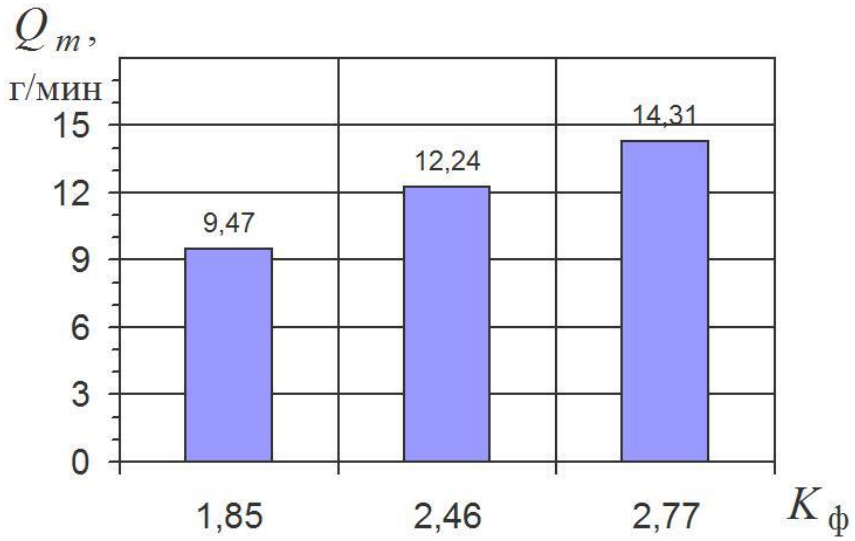


Рисунок 5.5 – Зависимость режущей способности (Q_m) отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при постоянном усилии прижатия заготовок

Из полученных результатов (рисунок 5.5) следует, что при переходе от изометрических шлифовальных зёрен ($K_ф$≈1,85) к зёрнам игольчато-

пластинчатой формы ($K_ф$≈2,77) режущая способность отрезных кругов возрастает в 1,51 раза. Режущая способность отрезных кругов из зёрен изометрической формы на 22,6 % ниже, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не разделённых по признаку формы ($K_ф$≈2,46). Для отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен, наоборот, режущая способность на 16,9 % выше, чем у стандартных кругов.

Полученная зависимость отражается экспоненциальной функцией:

$$Q_m = 4{,}084 \cdot e^{0{,}451 \cdot K_ф}; \qquad R^2 = 0{,}92 \qquad (5.4)$$

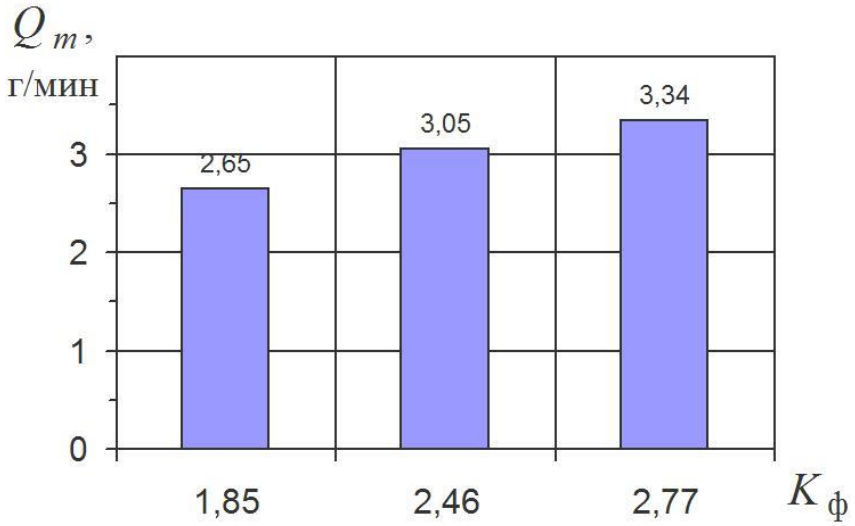


Рисунок 5.6 – Зависимость режущей способности (Q_m) отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при постоянной подаче кругов

Аналогичная по характеру зависимость выявлена при сравнительных испытаниях кругов по схеме с постоянной подачей. Из полученных результатов (рисунок 5.6) следует, что при переходе от изометрических шлифовальных зёрен ($K_ф$≈1,85) к зёрнам игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈2,77) режущая способность отрезных кругов возрастает в 1,26 раза. Режущая способность отрезных кругов из зёрен изометрической формы на 13,1 % ниже, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не разделённых по признаку формы ($K_ф$≈2,46). Для отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен, наоборот, режущая способность на 9,5 % выше, чем у стандартных кругов.

Полученная зависимость отражается экспоненциальной функцией следующего вида:

$$Q_m = 1{,}668 \cdot e^{\,0{,}249 \cdot K_ф}; \qquad R^2 = 0{,}95 \qquad (5.5)$$

Основной причиной роста режущей способности отрезных кругов при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам является различие величин углов резания у зёрен разной формы. Так, игольчатые зёрна имеют более острые углы резания и большие задние углы по сравнению с зёрнами изометрической формы [101, 104, 109, 110]. Соответственно, чем острее режущий клин шлифовальных зёрен, тем глубже они внедряются в обрабатываемую поверхность и больше сечения срезаемых стружек. Кроме того, чем выше коэффициент формы зёрен, тем большее их число находится в единице насыпного объёма абразива (п. 2.4). Поэтому отрезные круги из зёрен с высокими значениями $K_ф$ имеют большее количество режущих кромок на своей рабочей поверхности и активнее режут металл, вызывая меньшие деформации.

Сравнение режущей способности отрезных кругов при различных схемах резания показывает, что производительность обработки при постоянном усилии прижатия заготовки к кругу в 3,5÷4,3 раза выше, чем при постоянной подаче круга. При этом, чем выше коэффициент формы зёрен, тем больше разница в режущей способности отрезных кругов.

5.2.2 Коэффициент шлифования и эффективная мощность резания кругов из зёрен 13AF30 с заданной формой

Для оценки работоспособности опытных отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q В 50 м/с (230×3×32 13А63Н [$K_ф$] СТ3 Б 50 м/с) с контролируемой формой зёрен использован комплексный параметр – коэффициент шлифования ($K_ш$), как отношение массы снятого материала заготовки к израсходованной массе круга (5.2). Данный параметр является более предпочтительным при сравнительных испытаниях отрезных кругов, чем, например, оценка только их износа. Объясняется это тем, что шлифовальные круги (даже

из одной партии) могут различаться по высоте и иметь разное торцовое биение, что при оценке износа кругов по массе привнесёт погрешности в получаемые результаты из-за некоторого различия ширины канавок, прорезаемых этими инструментами. Напротив, при оценке работоспособности кругов через коэффициент шлифования подобные неточности исключаются. Кроме того, появляется возможность сопоставления получаемых данных с результатами других авторов, поскольку практически во всех исследованиях, связанных с абразивными инструментами, коэффициент шлифования фигурирует как один из основных оценочных параметров.

Испытания опытных отрезных кругов с контролируемой формой шлифовальных зёрен производились на ранее установленных рациональных режимах резания, выбранном оборудовании и заготовках. На рисунке 5.7 и рисунке 5.8 представлены результаты испытаний в виде диаграмм, отражающих зависимости коэффициента шлифования кругов от коэффициента формы зёрен.

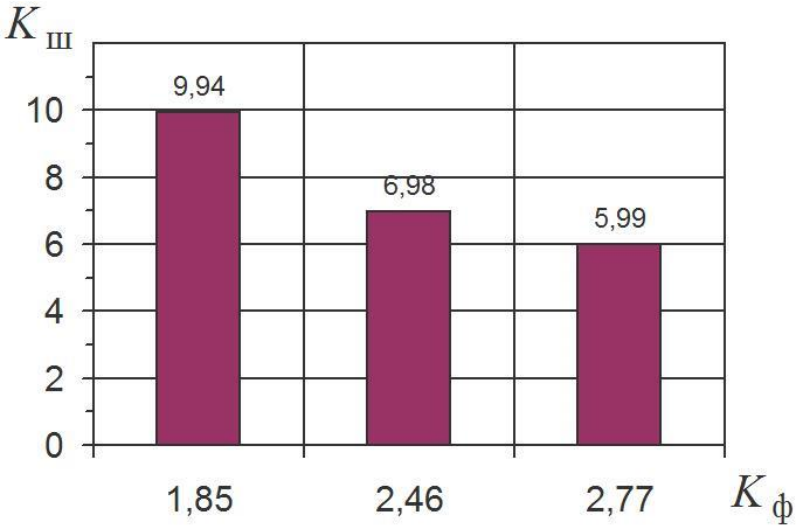


Рис. 5.7 – Зависимость коэффициента шлифования ($K_ш$) отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при постоянном усилии прижатия заготовок

Анализ полученных данных говорит о том, что форма шлифовальных зёрен оказывает существенное влияние на эффективность работы отрезных кругов. Переход от шлифовальных зёрен изометрической формы ($K_ф$≈1,85) к

игольчато-пластинчатым зёрнам ($K_ф$≈2,77) при постоянном усилии прижатия заготовки сопровождается снижением коэффициента шлифования отрезных кругов в 1,66 раза (рисунок 5.7). Коэффициент шлифования отрезных кругов из зёрен изометрической формы на 42,4 % выше, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не разделённых по форме ($K_ф$≈2,46). У отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен, наоборот, коэффициент шлифования на 14,2 % ниже, чем у стандартных кругов.

Полученная зависимость коэффициента шлифования отрезных кругов от коэффициента формы шлифовальных зёрен (рисунок 5.7) выражается степенной функцией следующего вида:

$$K_ш = 21{,}322 \cdot K_ф^{-1{,}254}; \qquad R^2 = 0{,}87 \qquad (5.6)$$

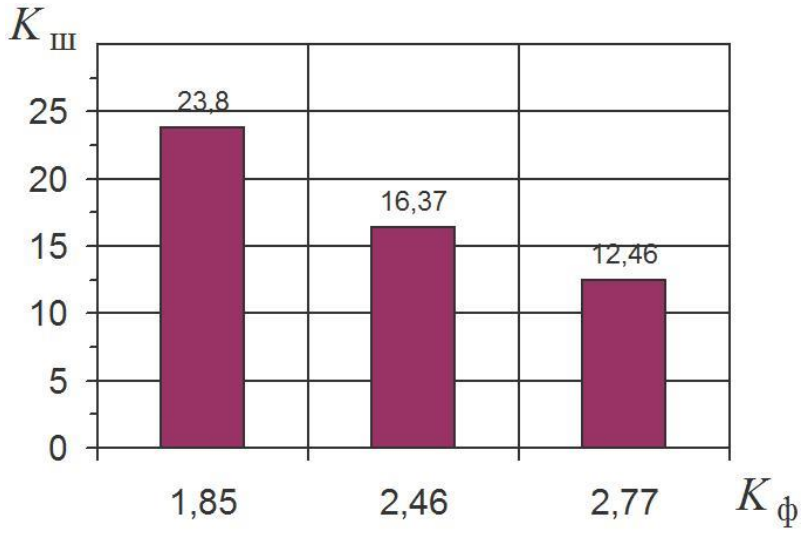


Рисунок 5.8 – Зависимость коэффициента шлифования ($K_ш$) отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при постоянной подаче кругов

Переход от шлифовальных зёрен изометрической формы ($K_ф$≈1,85) к игольчато-пластинчатым зёрнам ($K_ф$≈2,77) при постоянной подаче кругов сопровождается снижением коэффициента шлифования инструментов в 1,91 раза (рисунок 5.8). Коэффициент шлифования отрезных кругов из зёрен изометрической формы на 45,4 % выше, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не

разделённых по форме ($K_ф$≈2,46). У отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен коэффициент шлифования на 24,3 % ниже, чем у стандартных кругов.

Полученная зависимость коэффициента шлифования отрезных кругов от коэффициента формы шлифовальных зёрен (рисунок 5.8) выражается степенной функцией следующего вида:

$$K_ш = 62{,}713 \cdot K_ф^{-1{,}55}; \qquad R^2 = 0{,}93 \qquad (5.7)$$

Причиной снижения коэффициента шлифования у кругов с игольчато-пластинчатыми зёрнами, при наличии у этих же инструментов высоких показателей по режущей способности, является их интенсивный износ при работе. Чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зёрна, тем больше напряжения в них при работе, ниже их прочность и стойкость (см. главу 2). Поэтому, несмотря на то, что такие зёрна более эффективно срезают металл, они легче обламываются и крошатся, вызывая повышенный износ инструмента. Как следствие, круги с большими значениями коэффициентов формы хорошо режут обрабатываемый материал, но при этом интенсивно изнашиваются, обеспечивая невысокие величины коэффициентов шлифования.

Круги из изометрических зёрен, наоборот, изнашиваются медленно и, хотя и обладают сравнительно низкими показателями по режущей способности, в целом показывают высокие коэффициенты шлифования.

Сравнение коэффициентов шлифования кругов при различных схемах резания показывает, что при постоянной подаче кругов данный показатель в 2,1÷2,3 раза выше, чем при постоянном усилии прижатия заготовки к кругу. Соответственно, на аналогичные величины меньше износ при постоянной подаче кругов. При этом, чем выше коэффициент формы зёрен, тем меньше разница в коэффициентах шлифования кругов при различных схемах обработки.

Оценивая силы и мощность резания, можно получить представление о работоспособности шлифовальных инструментов и особенностях исследуемого процесса шлифования. Для изучения этого вопроса при проведении испытаний опытных отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен

Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q В 50 м/с (230×3×32 13А63Н [$K_ф$] СТ3 Б 50 м/с) измерялась мощность холостых и рабочих ходов и определялась эффективная мощность резания. Испытания проводились на выбранных ранее режимах резания, оборудовании и заготовках. На рисунке 5.9 представлена диаграмма, показывающая зависимость эффективной мощности резания отрезных кругов от коэффициента формы зёрен при постоянном усилии прижатия заготовки к кругу.

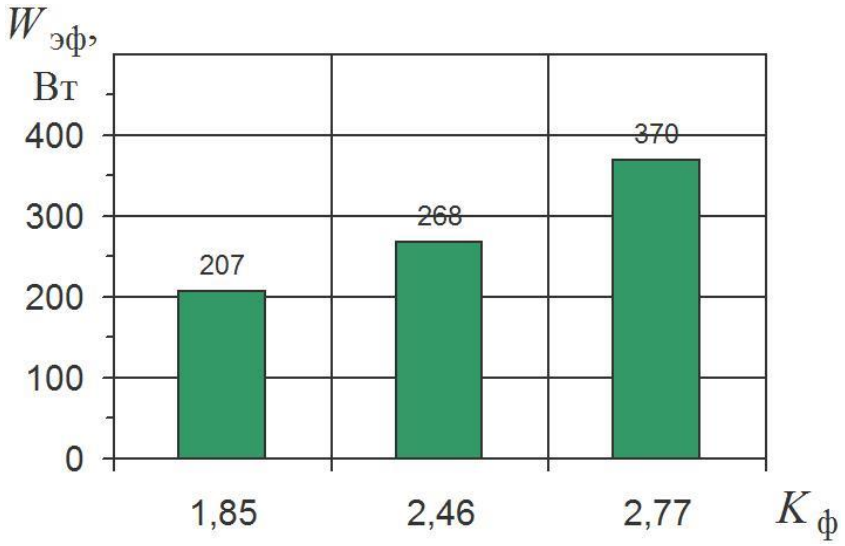


Рисунок 5.9 – Зависимость эффективной мощности резания ($W_{эф}$) от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при постоянном усилии прижатия заготовок к кругам

Полученные результаты свидетельствуют о том, что форма зёрен влияет на появление значительной разницы в мощности резания у отрезных шлифовальных кругов. Так, при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам эффективная мощность резания возрастает в 1,79 раза. По сравнению с отрезными кругами из исходных зёрен, не разделённых по форме, у кругов из изометрических зёрен отмечается снижение эффективной мощности резания на 22,8 %, а у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен данный параметр увеличивается на 38,1 %, что свидетельствует о преобладании при их работе активного процесса резания над пластическими деформациями металла.

Зависимость эффективной мощности резания отрезных кругов от коэффициента формы зёрен при постоянном усилии прижатия заготовки к кругу выражается следующей функцией:

$$W_{эф} = 65{,}088 \cdot e^{0{,}611 \cdot K_ф}; \qquad R^2 = 0{,}81 \qquad (5.8)$$

В число основных факторов, повлиявших на характер полученной зависимости, входит геометрия шлифовальных зёрен разной формы. Кроме того, дополнительное влияние на эффективную мощность резания оказывает число режущих микроклиньев на рабочей поверхности отрезных кругов с разной формой зёрен, которое тем больше, чем выше коэффициент формы зёрен в круге и схема резания. Так, при рассматриваемой схеме обработки снижение деформаций обрабатываемого материала (у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен) приводит к более эффективному и глубокому внедрению зёрен в обрабатываемую поверхность, что вызывает рост эффективной мощности резания и составляющей силы резания P_z. При этом, соотношение составляющих силы резания P_y/P_z пропорционально уменьшается при переходе от кругов с изометрическими к инструментам с игольчато-пластинчатыми зёрнами с 5,3 до 3 раз.

На рисунке 5.10 представлена зависимость эффективной мощности резания отрезных кругов от коэффициента формы зёрен при схеме резания с постоянной подачей инструмента.

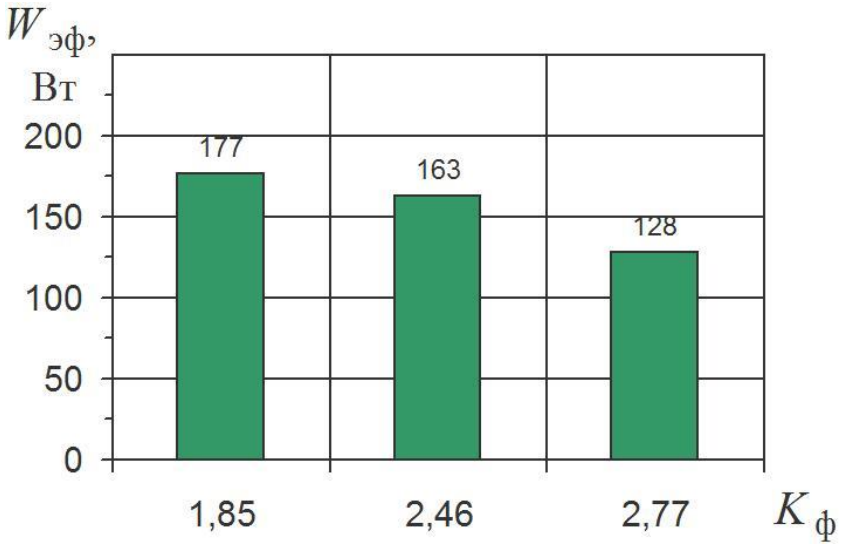


Рисунок 5.10 – Зависимость эффективной мощности резания ($W_{эф}$) от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при постоянной подаче кругов

Результаты исследований (рисунок 5.10) показывают, что форма зёрен влияет на различие эффективной мощности резания отрезных шлифовальных кругов при схеме резания с постоянной подачей круга. При этом наблюдается обратная картина по сравнению со схемой резания с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу. С увеличением коэффициента формы зёрен эффективная мощность резания снижается. Так, при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам эффективная мощность резания уменьшается в 1,38 раза. По сравнению с отрезными кругами из исходных зёрен, не разделённых по форме, у кругов из изометрических зёрен отмечается повышение эффективной мощности резания на 8,6 %, а у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен данный параметр уменьшается на 22,5 %.

Объясняется это тем, что зёрна изометрической формы характеризуются малыми величинами передних углов. Круги из таких зёрен обладают повышенной стойкостью, но при работе вызывают большие деформации обрабатываемого материала по сравнению со стандартными инструментами и склонны к засаливанию. Соответственно при постоянной подаче круга (когда подача на режущий микроклин неизменна независимо от формы использованных зёрен) применение изометрических зёрен вызывает рост эффективной мощности резания. Игольчато-пластинчатые зёрна, напротив, характеризуются большими передними углами, меньше деформируют металл и при схеме резания с постоянной подачей инструмента, когда величины срезаемых стружек практически неизменны, затрачивают меньшую мощность на резание.

Выявленная зависимость эффективной мощности резания отрезных шлифовальных кругов от коэффициента формы зёрен при постоянной подаче круга (рисунок 5.10) выражается следующей экспоненциальной зависимостью:

$$W_{эф} = 335{,}49 \cdot e^{-0{,}330 \cdot K_ф}; \qquad R^2 = 0{,}83 \qquad (5.9)$$

Кроме того, установлено, что эффективная мощность резания при отрезке по схеме круглого врезного шлифования в 1,2÷2,9 раза меньше, чем при резании с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу, что объясняется существенно меньшей производительностью шлифования.

5.2.3 Общие затраты электроэнергии при шлифовании кругами из зёрен 13AF30 с заданной формой на различных схемах обработки

В связи с тем, что при эксплуатации опытных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен на различных схемах шлифования выявлены разнонаправленные зависимости эффективной мощности резания от коэффициента формы зёрен, целесообразно также оценить общие затраты электроэнергии для рассмотренных случаев обработки. Такие исследования полезны, как с точки зрения потребителей шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен, так и с точки зрения общего понимания процессов, происходящих при эксплуатации этих инструментов.

Исходными данными для определения общих затрат электроэнергии послужили: результаты оценки эффективной мощности резания при эксплуатации опытных инструментов (рисунки 5.9 и 5.10); мощность холостого хода на шпинделе шлифовального станка при отрезке по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки ($W_{xx} \approx 440$ Вт); мощность холостого хода угловой шлифовальной машинки и мощность, затрачиваемая на вращение заготовки на токарном станке при работе по схеме круглого врезного шлифования (суммарно, порядка 2700 Вт). Кроме того, для оценки общих затрат электроэнергии при эксплуатации опытных кругов определено время работы ими. В качестве расчётного времени обработки принято время испытания опытных кругов 25-ю резами заготовки для каждой разновидности формы зёрен. Для этого измерена масса сошлифовываемого металла при 25-и кратной отрезке заготовок (труб 21,3×2,8 из стали 10), которая составила ≈ 95 г.

Известная масса срезаемого металла и данные по режущей способности шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен при различных схемах шлифования (рисунки 5.5 и 5.6) позволили установить машинное время для всех рассматриваемых случаев обработки.

При схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок у кругов с коэффициентами формы зёрен $K_ф \approx 1{,}85$, $K_ф \approx 2{,}46$ и $K_ф \approx 2{,}77$ оно, в сред-

нем, составило 10,03, 7,76 и 6,64 мин соответственно. Для схемы круглого врезного шлифования с постоянной подачей кругов с коэффициентами формы зёрен $K_ф \approx 1{,}85$, $K_ф \approx 2{,}46$ и $K_ф \approx 2{,}77$ время обработки составило, соответственно 35,85, 31,14 и 28,44 мин.

На основе полученных данных установлены зависимости затрат электроэнергии от формы зёрен в кругах при различных схемах шлифования, которые в виде диаграмм представлены на рисунках 5.11 и 5.12.

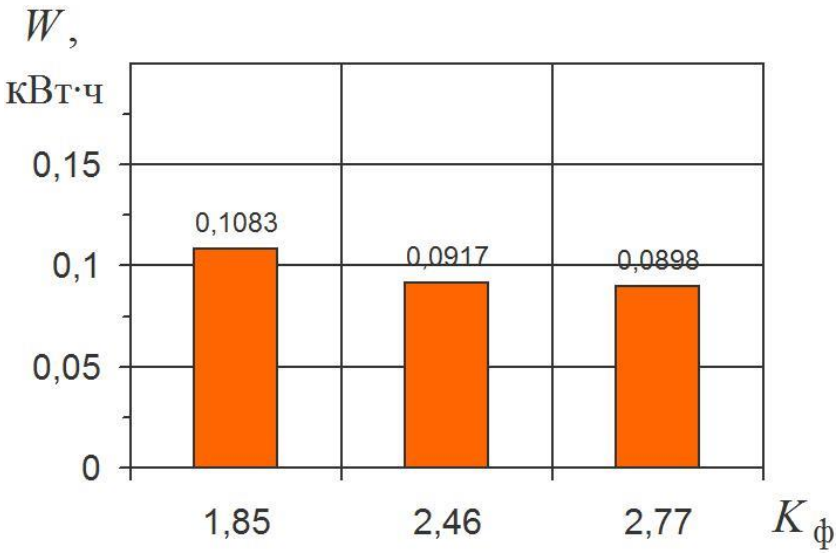


Рисунок 5.11 – Зависимость энергозатрат (W) от коэффициента формы зёрен ($K_ф$) в кругах Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с при отрезке заготовок по схеме с постоянным усилием прижатия к инструменту

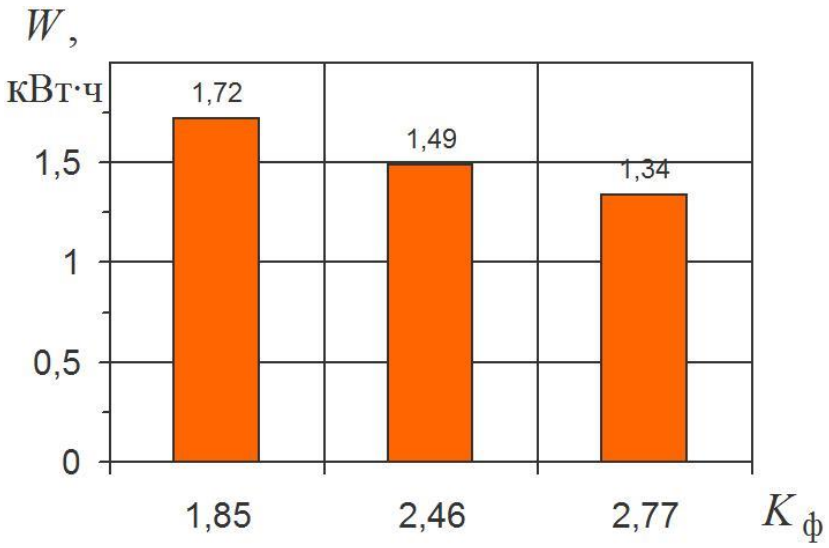


Рисунок 5.12 – Зависимость энергозатрат (W) от коэффициента формы зёрен ($K_ф$) при отрезке заготовок по схеме круглого врезного шлифования

Полученные результаты показывают, что, независимо от схемы шлифования, с увеличением коэффициента формы зёрен в кругах энергозатраты на обработку сокращаются.

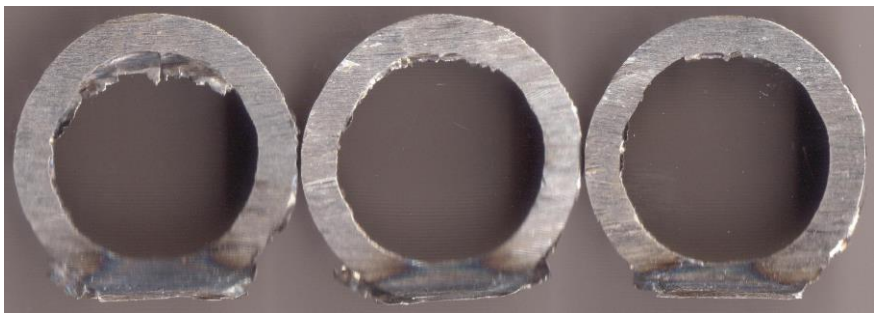
При схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок переход от изометрических к игольчато-пластинчатым зёрнам сопровождается снижением энергозатрат на обработку в 1,21 раза. Наибольшие затраты электроэнергии характеризуют работу инструментов из изометрических зёрен ($K_ф \approx 1,85$). Здесь они на 18 % больше, чем у кругов из обычных зёрен, не упорядоченных по форме ($K_ф \approx 2,46$).

При схеме круглого врезного шлифования рост коэффициентов формы зёрен сопровождается снижением энергозатрат на обработку в 1,28 раза. При использовании здесь кругов из изометрических зёрен ($K_ф \approx 1,85$) они на 15 % больше, чем у обычных инструментов ($K_ф \approx 2,46$), а при использовании кругов из игольчато-пластинчатых зёрен ($K_ф \approx 2,77$) – меньше на 10 %.

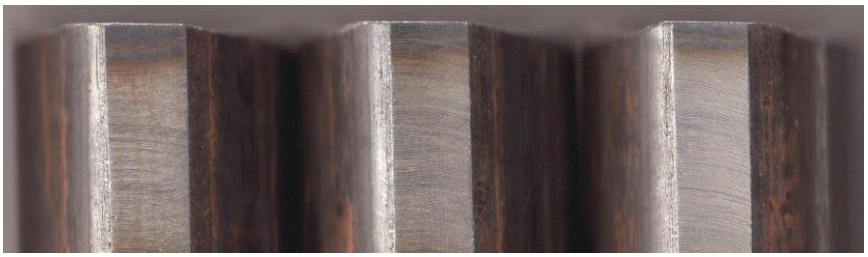
Основным фактором, определяющим характер полученных зависимостей, является превалирование величин мощностей холостого хода на шпинделях шлифовального оборудования и мощностей, затрачиваемых на вращение заготовок (при круглом врезном шлифовании) над мощностями, потребляемыми на резание. Так, при переходе от изометрических к игольчато-пластинчатым зёрнам эффективных мощность резания изменяется на 38÷78 % в зависимости от схемы шлифования. В то же время, различие мощностей рабочих ходов составляет 2÷25 %, а производительность обработки увеличивается на 25÷51 %. Поэтому, независимо от схемы шлифования, увеличение режущей способности инструментов и сокращение машинного времени посредством увеличения коэффициентов формы используемых зёрен (п. 5.2.1.) всегда приводит к снижению общих энергозатрат. Полученные результаты также показывают, что схема круглого врезного шлифования в 15÷16 раз менее энергоэффективна, чем схема с постоянным усилием прижатия между заготовкой и инструментом из-за пониженной в 3,5÷4,3 раза производительности и дополнительных энергозатрат на вращение заготовок.

5.2.4 Температура при резании, микротвёрдость и микроструктура заготовок, а также шероховатость обрабатываемых поверхностей после шлифования кругами из зёрен 13AF30 с контролируемой формой

Для определения температур вблизи плоскости отрезки при работе опытных отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с с контролируемой формой зёрен был применён способ, основанный на анализе цветов побежалости на поверхности металла. При проведении исследований в качестве заготовок использовались трубы, которые предварительно обрабатывались (как описано в п. 5.1.2.). Испытания проводились при тех же режимах резания и том же оборудовании, что и в предшествующих экспериментах, когда оценивались режущая способность, коэффициенты шлифования и эффективные мощности резания опытных отрезных кругов. Внешний вид торцов труб, разрезанных опытными отрезными кругами с контролируемой формой зёрен по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки, представлен на рисунке 5.13, *А*, а вид этих же труб в продольном направлении отражен на рисунке 5.13, *Б*.



А *а)* *б)* *в)*



Б *а)* *б)* *в)*

Рисунок 5.13 – Вид торцов труб (*А*) и труб в продольном направлении (*Б*), разрезанных по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки опытными отрезными кругами с разной формой зёрен: *а)* $K_ф$≈1,85; *б)* $K_ф$≈2,46; *в)* $K_ф$≈2,77

Из сравнения размеров зон с цветами побежалости на торцах и в продольном направлении заготовок (рисунок 5.13) видно, что при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам нагрев металла несколько снижается. На основе анализа полученных изображений (рисунок 5.13, *Б*) построены графики температуры металла на различном удалении от плоскости отрезки при работе шлифовальных кругов с разной формой зёрен (рисунок 5.14).

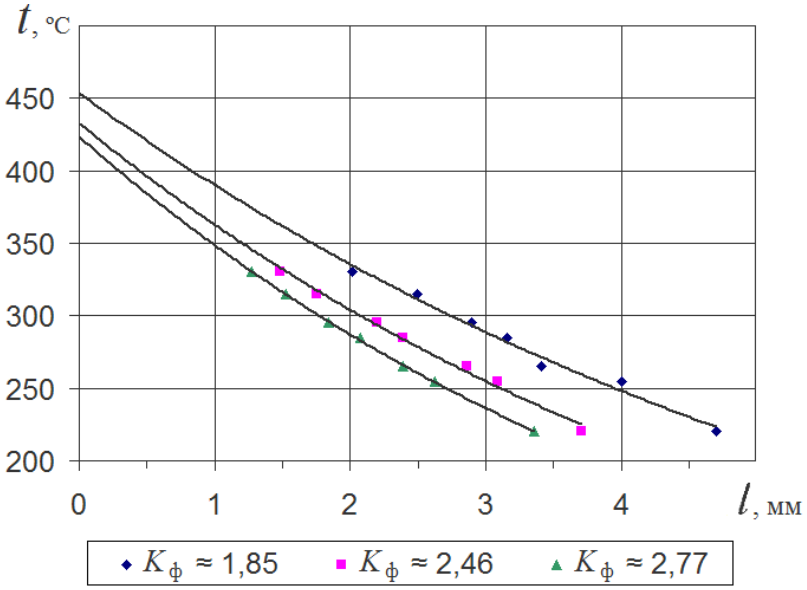


Рисунок 5.14 – Температура нагрева металла (*t*) на различном удалении от плоскости отрезки (*l*) при работе кругами с разной формой зёрен по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки

Результаты, представленные на рисунке 5.14, выражаются через экспоненциальные и логарифмические зависимости следующего вида:

$$K_ф \approx 1{,}85: \quad t = 453{,}59 \cdot e^{-0{,}151 \cdot l}; \quad R^2 = 0{,}98 \qquad (5.10)$$

$$K_ф \approx 2{,}46: \quad t = 432{,}64 \cdot e^{-0{,}176 \cdot l}; \quad R^2 = 0{,}99 \qquad (5.11)$$

$$K_ф \approx 2{,}77: \quad t = 423{,}41 \cdot e^{-0{,}194 \cdot l}; \quad R^2 = 0{,}99 \qquad (5.12)$$

$$t_{max} = 499{,}51 - 74{,}536 \cdot Ln(K_ф) \qquad (5.13)$$

Полученные данные говорят о том, что с увеличением коэффициента формы зёрен в круге, теплонапряжённость процесса резания несколько снижа-

ется. При этом, непосредственно в зоне резания температура прогрева металла не превышает 450 °С. Разница в нагреве металла при работе кругами с разной формой зёрен относительно невелика (21÷31 °С в зоне резания), но глубина прогрева металла при работе кругами с изометрической формой зёрен больше, чем при работе другими инструментами. И наоборот, меньше всего металл прогревается при использовании кругов с игольчато-пластинчатыми зёрнами. Таким образом, в случае обработки деталей, для которых важно уменьшение температуры резания, целесообразно использовать в кругах зёрна игольчато-пластинчатой формы с большими значениями коэффициента формы.

Для выяснения, как влияет разница в нагреве заготовок при отрезке на изменения в структуре и твёрдости обрабатываемого металла, был проведён цикл дополнительных исследований. В частности, для проведения исследований микротвёрдости и микроструктуры металла вблизи зоны резания, из образцов труб, обработанных опытными кругами, были изготовлены шлифы. Исследования микротвёрдости осуществлялись на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1 Н. При этом на каждом образце первые два измерения проводились на удалении 0,05 и 0,1 мм от края реза, а последующие – через 0,1 мм на максимальное удаление 1,0 мм. Результаты измерений представлены на рисунке 5.15.

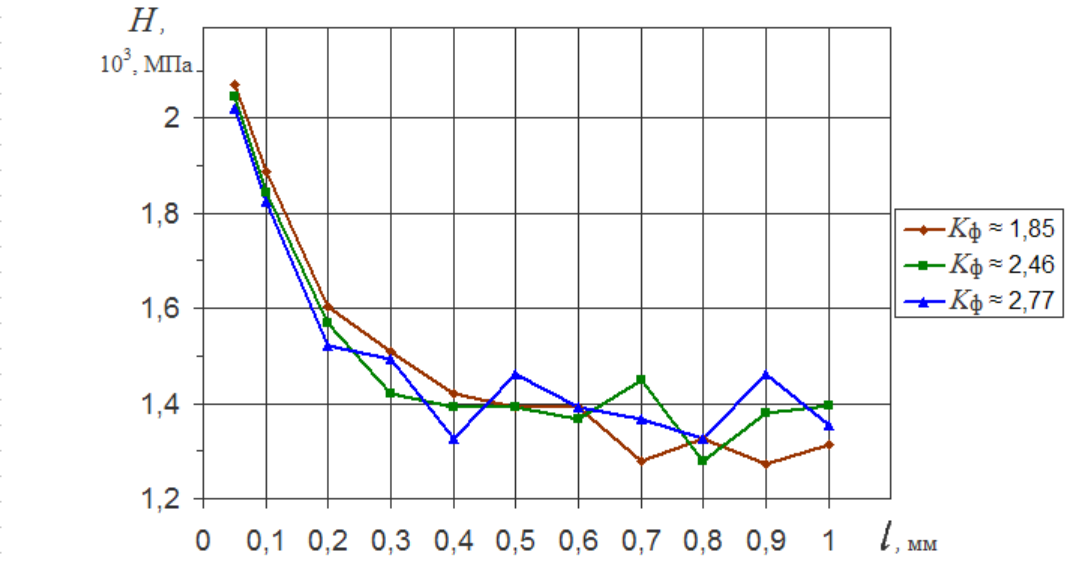
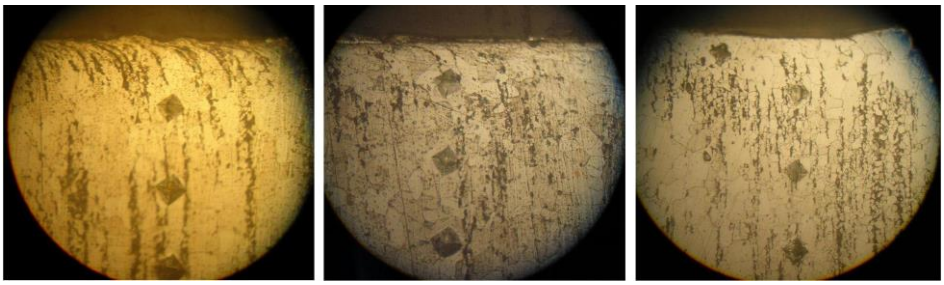


Рисунок 5.15 – Микротвёрдость образцов (*H*), после отрезки по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки кругами с разной формой зёрен, на различном удалении от зоны резания (*l*)

Полученные данные (рисунок 5.15) говорят о том, что вблизи плоскости отрезки у всех образцов имеется поверхностное упрочнение (наклёп), обусловленный некоторой пластической деформацией металла, характерной для процесса шлифования. Ввиду того, что обработка отрезными кругами из зёрен изометрической формы наиболее продолжительна по времени и сопровождается наибольшей степенью деформации, величина и зона поверхностного упрочнения здесь несколько выше, чем у стандартных кругов.

Для отрезных кругов из зёрен игольчато-пластинчатой разновидности имеет место обратная картина. Разница значений, однако, незначительна. Вместе с тем, исследованиями не выявлено снижения микротвёрдости, что дополнительно свидетельствует о том, что в процессе резания всеми типами опытных отрезных кругов критические температуры появления изменений или дефектов структуры металла не достигались. Выявленный результат подтвердился при изучении микроструктуры образцов после травления на стереомикроскопе ЛОМО МЕТАМ Р-1 (рисунок 5.16).



а) *б)* *в)*

Рисунок 5.16 – Микроструктура металла в образцах после отрезки по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки кругами с разной формой зёрен: *а)* $K_ф$≈1,85; *б)* $K_ф$≈2,46; *в)* $K_ф$≈2,77

Из представленных на рисунке 5.16 фотографий, в частности видно, что все образцы, обработанные опытными отрезными кругами из шлифовальных зёрен с разной формой, имеют характерную феррито-перлитную структуру. Дефектного изменения структуры не наблюдается. Достаточно чётко фиксируется зона поверхностного упрочнения, причём наиболее явно она выражена у

образца, обработанного шлифовальным кругом из изометрических зёрен, наименее явно – обработанного кругом из игольчато-пластинчатых зёрен.

При круглом врезном шлифовании с постоянной подачей круга на торцах заготовок отсутствуют цвета побежалости, что свидетельствует о том, что температура в зоне резания не превышала 220 °С (рисунок 5.17). Тем не менее, фиксируются следы пластической деформации материала, которые уменьшаются с ростом коэффициента формы зёрен. Так, при работе кругами из игольчато-пластинчатых зёрен пластические деформации материала практически отсутствуют.



а) *б)* *в)*

Рисунок 5.17 – Вид торцов труб, разрезанных отрезными кругами с разной формой зёрен при работе по схеме круглого врезного шлифования:
а) $K_ф$≈1,85; *б)* $K_ф$≈2,46; *в)* $K_ф$≈2,77

Таким образом, применение шлифовальных кругов с разной формой зёрен для отрезки заготовок из конструкционных сталей на выбранных схемах и режимах резания не вызывает появления дефектов металла вследствие его перегрева. Однако, для случаев обработки деталей, для которых важно уменьшение температуры резания, целесообразно использовать круги с игольчато-пластинчатой разновидностью формы зёрен. Кроме того, следует отметить, что схема круглого врезного шлифования значительно эффективнее схемы отрезки с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу с точки зрения снижения теплонапряжённости процесса резания.

Исследования влияние формы зёрен на шероховатость обрабатываемых поверхностей производилось на профилографе-профилометре «Talysurf 5-120»

по параметру R_a. Измерения производились на торцевых поверхностях заготовок, разрезанных при схеме круглого врезного шлифования. При проведении исследований для каждого коэффициента формы зёрен использовалось по четыре заготовки, разрезанных этими инструментами. Шероховатость измерялась на торцевых поверхностях тех частей заготовок, которые после отрезки оставались закреплёнными в патроне станка. При этом, на каждой заготовке снималось по 12 измерений на участках торцевых поверхностей, равномерно распределённых по окружности разрезанных труб через 30°. Полученные результаты представлены в виде диаграммы на рисунке 5.18.

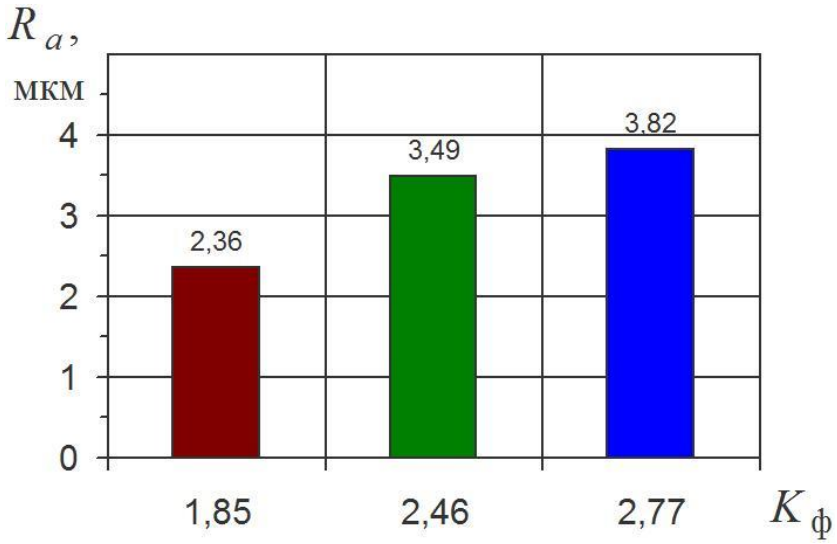


Рисунок 5.18 – Зависимость шероховатости обработанных поверхностей (R_a) от коэффициента формы зёрен ($K_ф$) после обработки по схеме круглого врезного шлифования кругами Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с

Из них следует, что с увеличением коэффициента формы зёрен и, соответственно, с ростом их передних углов, возрастают величины микронеровностей обрабатываемых поверхностей. Так, при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам шероховатость обрабатываемых поверхностей увеличивается в 1,6 раза. При использовании зёрен игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈2,77) зафиксировано увеличение шероховатости поверхностей на 9,5% по сравнению с применением в шлифовальных кругах обычных зёрен, не упорядоченных по форме ($K_ф$≈2,46). При использовании зё-

рен изометрической формы ($K_ф$≈1,85), напротив, наблюдается снижение шероховатости обработанных поверхностей на 32,4 %.

Таким образом, режущие микроклинья с большими передними углами оставляют более глубокие риски, в то время как зёрна изометрической формы, характеризующиеся меньшими величинами передних углов, шлифуют заготовку с большими деформациями и сильнее выглаживают обрабатываемую поверхность.

Выявленная зависимость шероховатости обработанных поверхностей от коэффициента формы зёрен 13AF30 в шлифовальных кругах (рисунок 5.18) выражается следующей степенной зависимостью:

$$R_a = 1{,}145 \cdot K_ф^{1{,}167}; \qquad R^2 = 0{,}77 \qquad (5.14)$$

Полученные результаты по влиянию формы зёрен на шероховатость обрабатываемых поверхностей коррелируют с исследованиями других авторов, например, в области применения шлифовальных кругов на чистовых операциях изготовления колец подшипников [97], при эксплуатации лепестковых кругов и шлифовальных лент [95, 189], с результатами исследований глубины рисок, получаемых единичными зёрнами разной формы [83].

Комплексная оценка результатов исследований показывает, что форма зёрен оказывает существенное влияние на теплонапряжённость процесса шлифования и качество обрабатываемых поверхностей. Целенаправленное регулирование формы зёрен позволяет снижать температуру в зоне резания и шероховатость обрабатываемых поверхностей. В тех случаях, когда приоритетным является снижение температуры при шлифовании (например, при отрезке закалённых рельс кругами на бакелитовой связке без принудительного охлаждения), целесообразно применять зёрна игольчато-пластинчатой формы с большими значениями коэффициентов формы. Для чистовых операций шлифования, когда обработка ведётся на умеренных режимах резания, с принудительным охлаждением и приоритетным является достижение минимальной шероховатости обрабатываемых поверхностей, рационально использовать в шлифовальных инструментах зёрна изометрической формы с малыми величинами $K_ф$.

5.3 Исследование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов из зёрен 53CF54 с заданной формой при различных схемах обработки

В данном разделе описаны исследования эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с (230×3×22 53C32H [$K_ф$] СТ3 БУ 80 м/с), изготовленных из зёрен с контролируемой формой. Исследования проведены с целью оценки адекватности и повторяемости выявленного при испытаниях отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с (230×3×32 13A63H [$K_ф$] Q B 50 м/с) характера влияния формы зёрен на работоспособность шлифовальных кругов (п. 5.2).

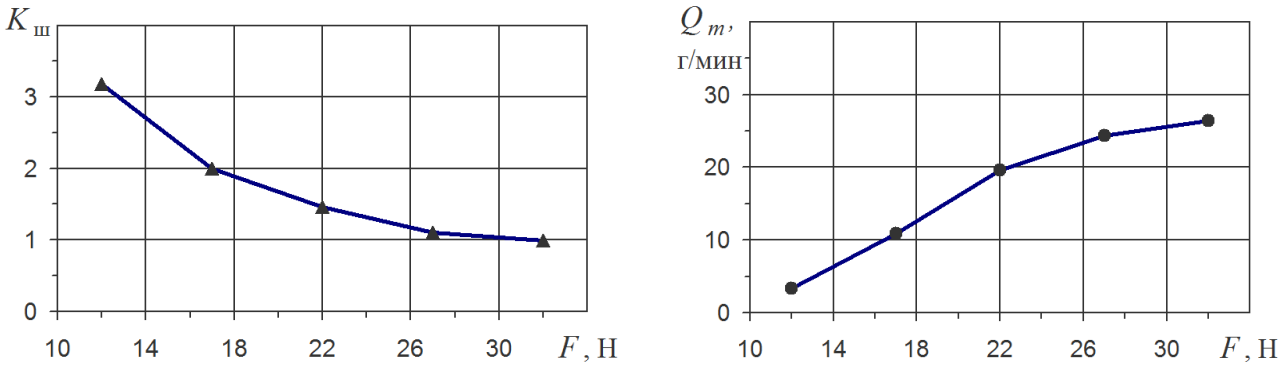
В данном случае для изготовления кругов применены зёрна другой марки (с другим химическим составом и зернистостью). Круги армированы стеклосетками, что позволило работать ими на более высокой рабочей скорости (80 м/с). В частности, для проведения исследований изготовлены круги из зёрен карбида кремния чёрного марки 53CF54 изометрической формы ($K_ф$≈1,87) и круги из зёрен игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈3,31). Кроме того, в качестве сравнительного эталона, изготовлены круги из исходных зёрен этой же марки, не подвергнутых сепарации ($K_ф$≈2,74). Работоспособность отрезных кругов с контролируемой формой зёрен исследована при различных схемах резания: с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу и с постоянной подачей круга. Схема с постоянной подачей круга характерна для многих операций шлифования: круглого, круглого врезного, плоского. Получаемые результаты эффективности эксплуатации отрезных кругов при постоянной подаче инструмента можно экстраполировать и на перечисленные операции шлифования.

5.3.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности кругов из зёрен 53CF54 с заданной формой

Режимы обработки для отрезки по схеме круглого врезного шлифования были выбраны по результатам испытаний обычных кругов [148]. Частота вра-

щения шпинделя токарного станка с заготовкой составляла 31,5 об/мин, а поперечная подача кругов 0,084 мм/об.

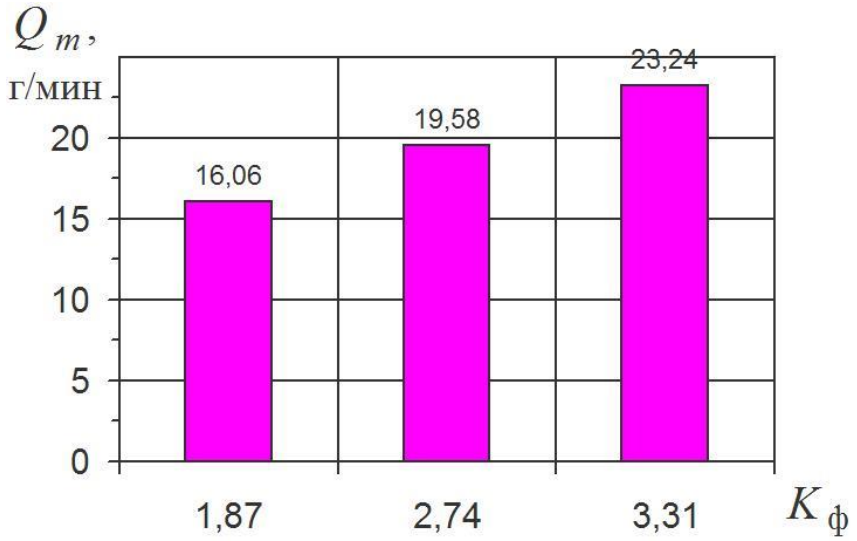
Режимы резания для схемы с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу определялись согласно методике, описанной в разделах. 5.1.1 и 5.2.1. На основе результатов оценки режущей способности и коэффициента шлифования кругов из несортированных по форме зёрен 53CF54 при различных режимах обработки (рисунок 5.19), а также возможности засаливания или неравномерного износа инструментов при рассматриваемых режимах установлено, что в данном случае рациональное усилие прижатие заготовок составляет F=22 Н.



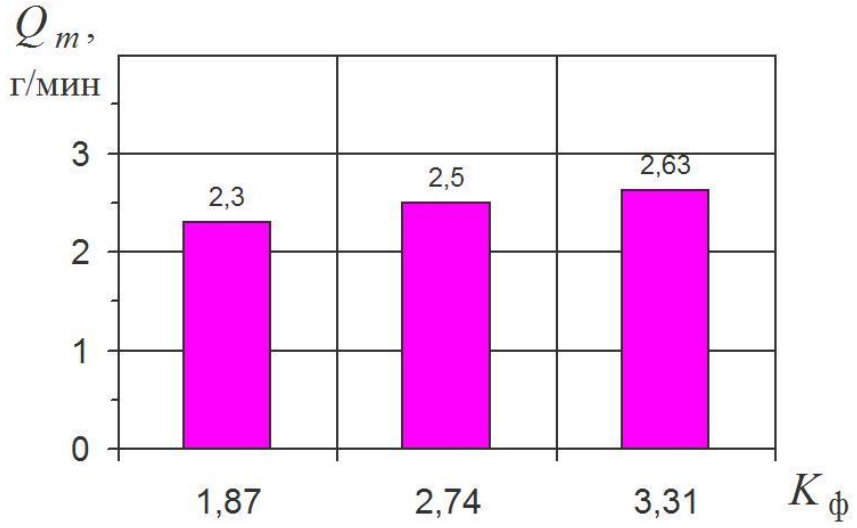
а) *б)*

Рисунок 5.19 – Зависимость режущей способности (*а*) и коэффициента шлифования (*б*) отрезных кругов от усилия прижатия заготовки к кругу

Для определения режущей способности шлифовальных кругов Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с (230×3×22 53C32H [$K_ф$] СТ3 БУ 80 м/с с контролируемой формой зёрен проведены эксперименты на испытательных стендах (п. 5.1.2), на установленных рациональных режимах резания и выбранных заготовках. Полученные результаты представлены в виде диаграмм (рисунок 5.20, *а, б*) из которых следует, что при переходе от изометрических шлифовальных зёрен ($K_ф$≈1,87) к зёрнам игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈3,31) режущая способность отрезных кругов возрастает независимо от схемы обработки. Так, при шлифовании с постоянным усилием прижатия заготовок (рисунок 5.20, *а*) режущая способность кругов увеличивается в 1,45 раза.



а)



б)

Рисунок 5.20 – Зависимость режущей способности (Q_m) отрезных кругов Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при обработке с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

В рассматриваемом случае (рисунок 5.20, *а*) режущая способность инструментов из зёрен изометрической формы на 18 % ниже, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не разделённых по форме ($K_ф$≈2,74). Для отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен, наоборот, режущая способность на 19 % выше, чем у стандартных инструментов.

Результаты сравнительных испытаний кругов по схеме обработки с их постоянной подачей (рисунок 5.20, *б*) показывают, что при переходе от изомет-

рических шлифовальных зёрен ($K_ф$≈1,8) к зёрнам игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈3,31) режущая способность отрезных кругов возрастает в 1,14 раза. Так, режущая способность отрезных кругов из зёрен изометрической формы здесь на 8 % ниже, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не разделённых по форме ($K_ф$≈2,74). Режущая способность отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен на 5,2 % выше, чем у стандартных кругов.

Полученные зависимости отражаются экспоненциальными моделями следующего вида:

P_y=const $\quad Q_m = 2{,}011 \cdot e^{0{,}153 \cdot K_ф}$; $\quad R^2$=0,91 (5.15)

$S_{круга}$=const $\quad Q_m = 1{,}960 \cdot e^{0{,}089 \cdot K_ф}$; $\quad R^2$=0,97 (5.16)

Основной причиной роста режущей способности отрезных кругов при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам является различие величин углов резания у зёрен разной формы. Так, игольчатые зёрна имеют большие передние и задние углы по сравнению с зёрнами изометрической формы [101, 104, 109, 110]. Соответственно, чем острее режущий клин шлифовальных зёрен, тем лучше они внедряются в обрабатываемую поверхность и меньше деформируют обрабатываемый материал. Кроме того, чем выше коэффициент формы зёрен, тем большее их число находится в единице насыпного объёма абразива. Поэтому отрезные круги из зёрен с высокими значениями $K_ф$ имеют большее количество режущих кромок на своей рабочей поверхности и режут металл более активно, вызывая меньшие деформации.

Выявленный характер зависимостей подтверждается результатами оценки передних углов зёрен и их количества в единице объёма при различных $K_ф$ (п. 2.4, п. 2.5) и результатами испытаний шлифовальных кругов из зёрен другой марки и зернистости на иной рабочей скорости (п. 5.2.1)

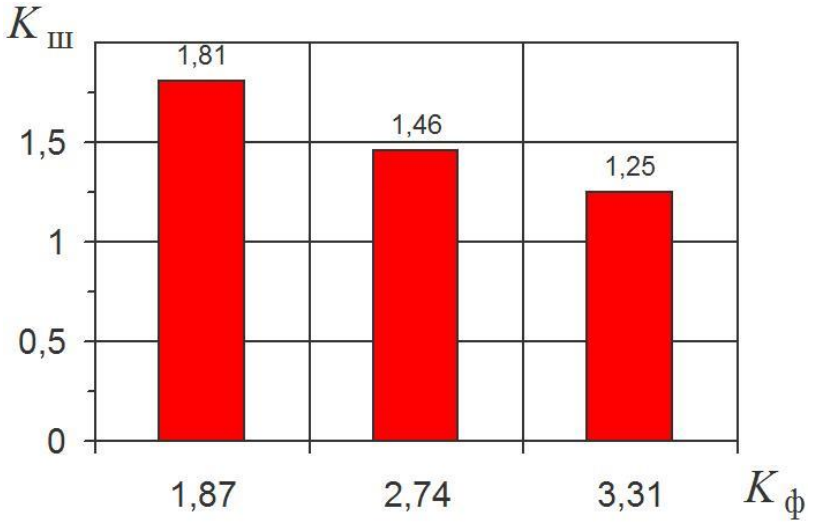
Кроме того, сравнение режущей способности отрезных кругов при различных схемах резания показывает, что производительность обработки при постоянном усилии прижатия заготовки к кругу в 7÷9 раз выше, чем при постоянной подаче круга. При этом, чем выше коэффициент формы зёрен, тем больше разница в режущей способности шлифовальных кругов.

5.3.2 Коэффициент шлифования и эффективная мощность резания кругов из зёрен 53CF54 с заданной формой

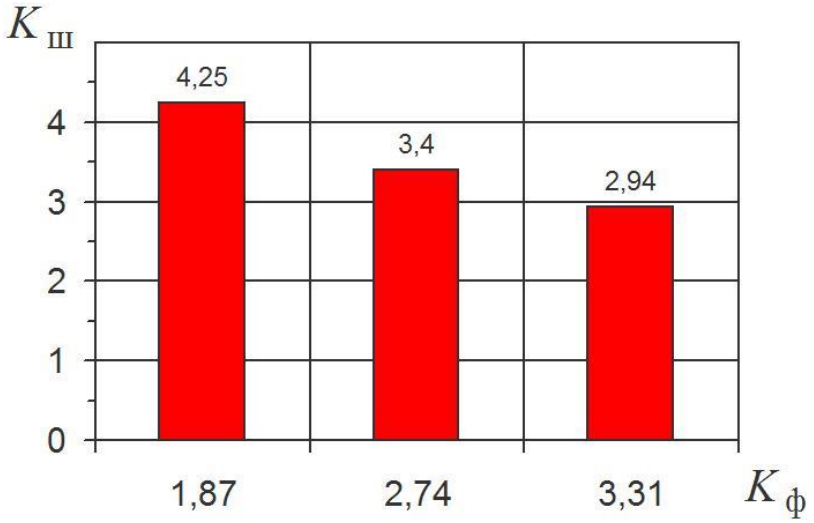
Для оценки работоспособности опытных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с (230×3×22 53C32H [$K_ф$] СТ3 БУ 80 м/с) с контролируемой формой зёрен использован комплексный параметр – коэффициент шлифования ($K_ш$), как отношение массы снятого материала заготовки к изношенной массе круга. Данный параметр предпочтительнее при сравнительных испытаниях отрезных кругов, чем, например, оценка только их износа и согласно ГОСТ на отрезные круги, коэффициент шлифования является одним из основных показателей этих инструментов при испытаниях.

Испытания опытных отрезных кругов с контролируемой формой шлифовальных зёрен производились на ранее установленных рациональных режимах резания, выбранном оборудовании и заготовках. На рисунке 5.21 представлены результаты испытаний в виде диаграмм, отражающих зависимости коэффициента шлифования кругов от коэффициента формы зёрен при различных схемах обработки. Анализ полученных данных говорит о том, что форма шлифовальных зёрен оказывает существенное влияние на эффективность работы отрезных кругов. Переход от шлифовальных зёрен изометрической формы ($K_ф$≈1,87) к игольчато-пластинчатым зёрнам ($K_ф$≈3,31) во всех случаях сопровождается снижением коэффициента шлифования кругов. В частности, при испытании опытных кругов по схеме с постоянным усилием прижатия заготовок (рисунок 5.21, *а*) указанное снижение составляет 1,49 раза. Коэффициент шлифования отрезных кругов из зёрен изометрической формы здесь на 24 % выше, чем у обычных инструментов из исходных зёрен, не разделённых по форме ($K_ф$≈2,74). У отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен, напротив, коэффициент шлифования на 14,4 % ниже, чем у стандартных кругов.

Переход от использования в кругах шлифовальных зёрен изометрической формы ($K_ф$≈1,87) к игольчато-пластинчатым зёрнам ($K_ф$≈3,31) при круглом врезном шлифовании сопровождается снижением $K_ш$ инструментов в 1,45 раза.



а)



б)

Рисунок 5.21 – Зависимость коэффициента шлифования ($K_ш$) отрезных кругов Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при резании с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

В рассматриваемом случае (рисунок 5.21, *б*) коэффициент шлифования отрезных кругов из зёрен изометрической формы на 25 % выше, чем у обычных кругов из исходных зёрен, не разделённых по форме ($K_ф$≈2,74). У отрезных кругов из игольчато-пластинчатых зёрен коэффициент шлифования на 13,5 % ниже, чем у стандартных кругов.

Полученные зависимости коэффициента шлифования отрезных кругов от коэффициента формы шлифовальных зёрен (рисунок 5.21) выражаются степен-

ными моделями следующего вида:

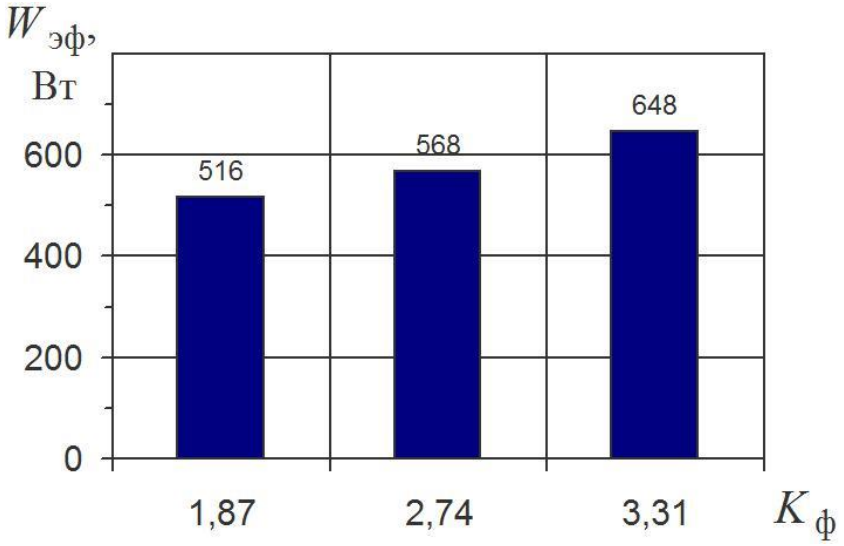
P_y=const $\quad K_ш = 2{,}583 \cdot K_ф^{-0{,}592}$; $\quad R^2$=0,91 (5.17)

$S_{круга}$=const $\quad K_ш = 6{,}058 \cdot K_ф^{-0{,}593}$; $\quad R^2$=0,95 (5.18)

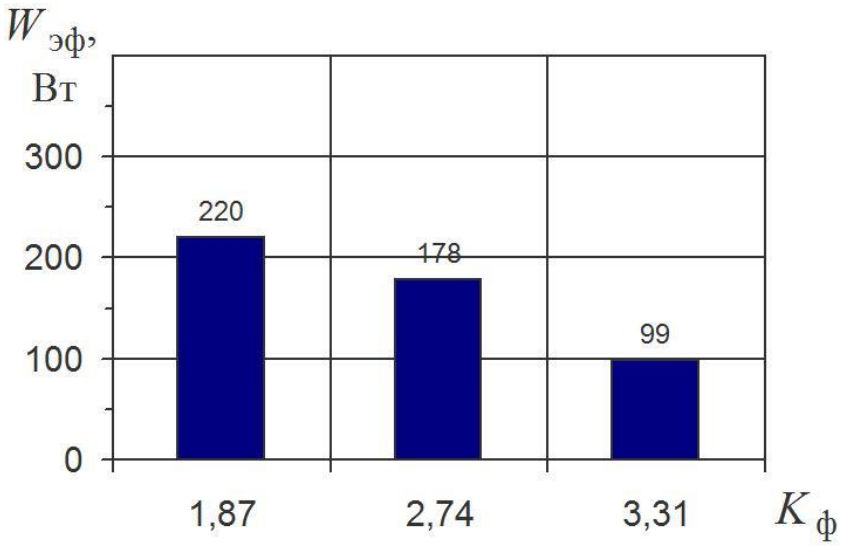
Причиной снижения коэффициента шлифования у кругов с игольчато-пластинчатыми зёрнами, при наличии у них высоких показателей по режущей способности, является их интенсивный износ при работе. Чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зёрна, тем большие напряжения возникают в них при работе, тем ниже их прочность и стойкость (глава 2, пп. 2.6÷2.8). Поэтому, несмотря на то, что такие зёрна более эффективно срезают металл, они легче обламываются и крошатся, вызывая сильный износ инструмента. Как следствие, круги с большими значениями коэффициентов формы производительно режут обрабатываемый материал, но при этом интенсивно изнашиваются, обеспечивая невысокие величины коэффициентов шлифования. Круги из изометрических зёрен, наоборот, изнашиваются медленно, хотя и обладают сравнительно низкими показателями по режущей способности.

Сравнение коэффициентов шлифования кругов при различных схемах резания показывает, что при постоянной подаче кругов данный показатель в 2,3÷2,4 раза выше, чем при постоянном усилии прижатия заготовок к кругам. Соответственно, на аналогичные величины меньше износ при постоянной подаче кругов. При этом, чем выше коэффициент формы зёрен, тем меньше разница в коэффициентах шлифования инструментов.

Для оценки эффективной мощности резания при испытаниях опытных отрезных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с (230×3×22 53C32H [$K_ф$] СТ3 БУ 80 м/с) с контролируемой формой зёрен измерялась мощности холостых и рабочих ходов. На рисунке 5.22 представлены диаграммы, показывающие зависимости эффективной мощности резания отрезных кругов от коэффициента формы зёрен при различных схемах шлифования. Полученные результаты свидетельствуют о том, что форма зёрен влияет на появление значительной разницы в мощности резания. При этом схема обработки также существенно влияет на характер выявленных зависимостей.



а)



б)

Рисунок 5.22 – Зависимость эффективной мощности резания ($W_{эф}$) кругами Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с от коэффициента формы шлифовальных зёрен ($K_ф$) при обработке с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

Так, при шлифовании с постоянным усилием прижатия заготовок к инструментам (рисунок 5.22, *а*), переход от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам сопровождается ростом эффективной мощности резания и составляющей силы резания P_z (в 1,26 раза). По сравнению с отрезными кругами из исходных зёрен, не разделённых по форме, у кругов из изометрических зёрен здесь отмечается снижение эффективной мощности резания на 9,2%, а у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен данный параметр увеличивается на

14,1%, что свидетельствует о преобладании при их работе активного процесса резания над пластическими деформациями металла. При этом, соотношение составляющих P_y/P_z пропорционально уменьшается с ростом $K_ф$ зёрен в инструментах с 3,7 до 2,4 раз. Характер выявленной зависимости объясняется тем, что зёрна игольчато-пластинчатой формы характеризуются большими передними углами, меньше деформируют металл и режут более производительно (п. 5.3.1), снимают стружки большего сечения при постоянном усилии прижатия заготовки, повышая тем самым эффективную мощность резания.

Результаты исследований также показывают, что форма зёрен при схеме резания с постоянной подачей (рисунок 5.22, *а*) по-иному влияет на различие эффективной мощности резания отрезных шлифовальных кругов, по сравнению со схемой резания с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу. С увеличением коэффициента формы зёрен эффективная мощность резания в рассматриваемом случае снижается.

Так, при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам эффективная мощность резания уменьшается в 2,2 раза. По сравнению с отрезными кругами из исходных зёрен, не разделённых по форме, у кругов из изометрических зёрен отмечается повышение эффективной мощности резания на 23,6 %. Напротив, у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен данный параметр уменьшается на 44 %. Объясняется это тем, что зёрна изометрической формы характеризуются малыми величинами передних углов (глава 2). Круги из таких зёрен обладают повышенной стойкостью, но склонны к засаливанию и при работе вызывают большие деформации материала по сравнению со стандартными инструментами. Соответственно, при шлифовании с постоянной подачей, когда толщины срезаемых стружек практически неизменны, использование инструмента из изометрических зёрен приводит к возрастанию эффективной мощности резания. Игольчато-пластинчатые зёрна характеризуются большими передними углами, меньше деформируют металл и при постоянной подаче на режущие микроклинья затрачивают меньшую эффективную мощность резания.

Выявленные зависимости эффективной мощности резания отрезных шлифовальных кругов от коэффициента формы зёрен при различных схемах обработки выражаются следующими математическими моделями:

P_y=const $\quad W_{эф} = 392{,}3 \cdot e^{0{,}146 \cdot K_ф}$; $\quad R^2$=0,95 (5.19)

$S_{круга}$=const $\quad W_{эф} = 579{,}06 \cdot e^{-0{,}499 \cdot K_ф}$; $\quad R^2$=0,84 (5.20)

В процессе проведения испытаний установлено также, что эффективная мощность резания при отрезке по схеме круглого врезного шлифования в 2,3÷6,5 раза меньше, чем при резании с постоянным усилием прижатия заготовок к инструментам, что объясняется существенно меньшей производительностью шлифования при использовании схемы резания с постоянной подачей кругов.

Сравнение результатов оценки эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен с характеристиками Тип41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с и Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с (п. 5.2) показывают, что, независимо от марки абразивных зёрен и их зернистости, схемы и режимов резания, характер влияния формы зёрен на работоспособность инструментов остаётся подобным. Характер этого влияния выражается в том, что с увеличением коэффициента формы зёрен возрастают величины их передних углов, что в целом облегчает процесс резания, снижает деформации обрабатываемого материала и, как следствие, повышает режущую способность шлифовальных инструментов и приводит к уменьшению температуры в зоне резания. Вместе с тем, при увеличении коэффициента формы зёрен снижается их прочность, что выражается в повышении износа шлифовальных инструментов.

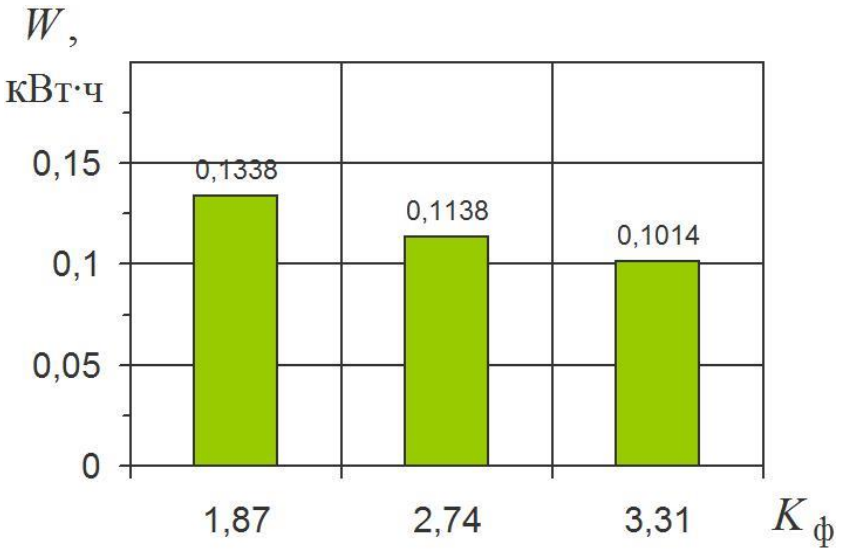
Различие в схеме шлифования влияет на различие в характере изменения эффективной мощности резания при использовании инструментов с различной формой зёрен. Так, с ростом коэффициента формы зёрен в кругах при обработке с постоянным усилием прижатия заготовок к инструменту наблюдается увеличение эффективной мощности резания. При схеме шлифования с постоянной подачей кругов наблюдается обратная картина.

5.3.3 Общие затраты электроэнергии при шлифовании кругами из зёрен 53CF54 с заданной формой на различных схемах обработки

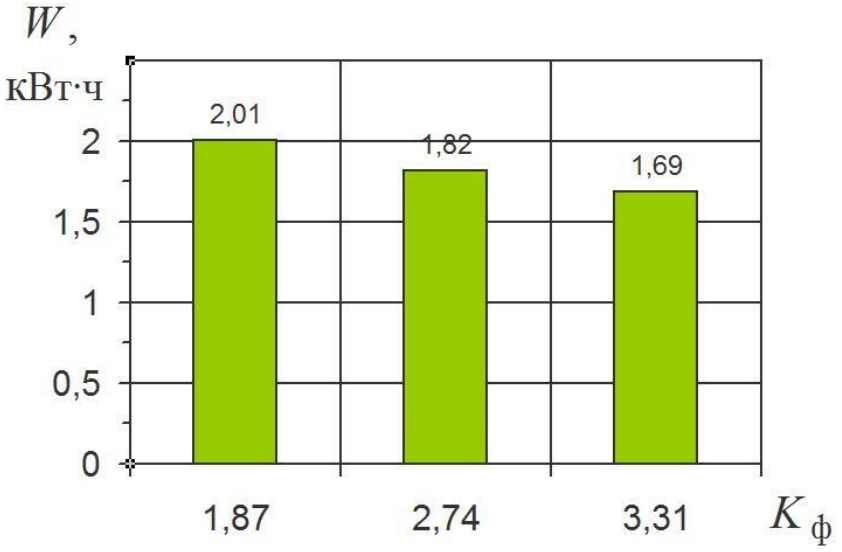
Как и в предыдущем случае, при испытаниях шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен марки 13AF30 (п. 5.2.3), исходными данными для определения общих затрат электроэнергии при работе кругами из зёрен 53CF54 послужили: результаты оценки эффективной мощности резания при эксплуатации опытных инструментов (рисунки 5.24 и 5.25); мощность холостого хода на шпинделе шлифовального станка при отрезке по схеме с постоянным усилием прижатия заготовки ($W_{xx} \approx$ 840 Вт); мощность холостого хода угловой шлифовальной машинки и мощность, затрачиваемая на вращение заготовки на токарном станке при работе по схеме круглого врезного шлифования (суммарно, порядка 2700 Вт). Кроме того, определено время обработки при 25-и кратной отрезке заготовок (труб 21,3×2,8 из стали 10) кругами из зёрен с различными коэффициентами формы. Расчёты машинного времени проведены исходя из измеренной массы снятого металла (≈ 95 г) и данных по режущей способности опытных кругов при различных схемах шлифования (рисунки 5.20 и 5.21).

Машинное время обработки у инструментов с коэффициентами формы зёрен $K_ф \approx$ 1,87, $K_ф \approx$ 2,74 и $K_ф \approx$ 3,31 при схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок составило, в среднем, 5,92, 4,85 и 4,09 мин соответственно. Для схемы круглого врезного шлифования с постоянной подачей кругов с коэффициентами формы зёрен $K_ф \approx$ 1,87, $K_ф \approx$ 2,74 и $K_ф \approx$ 3,31 время обработки составило, соответственно 41,3, 38 и 36,12 мин, т.е. в 7÷9 раз больше, чем в предыдущем случае.

На основе полученных данных установлены зависимости затрат электроэнергии от коэффициента формы зёрен в кругах при различных схемах шлифования (рисунки 5.23, *а, б*). Их характер остаётся неизменным независимо от схемы шлифования, а также от марки и зернистости использованного абразива (п. 5.2.3). А именно,– с увеличением коэффициента формы зёрен в кругах энергозатраты на обработку сокращаются.



а)



б)

Рисунок 5.23 – Зависимость энергозатрат (W) от коэффициента формы зёрен ($K_ф$) в кругах Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с при отрезке заготовок по схеме с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

Так, при схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок энергозатраты снижаются в 1,32 раза. Энергозатраты при эксплуатации инструментов из изометрических зёрен ($K_ф \approx 1{,}87$) здесь на 18 % больше (рисунок 5.23, *а*), чем у кругов из обычных зёрен, не упорядоченных по форме ($K_ф \approx 2{,}74$). При использовании кругов из игольчато-пластинчатых зёрен ($K_ф \approx 3{,}31$) энергозатраты уменьшаются на 11 %.

При схеме круглого врезного шлифования увеличение коэффициентов формы зёрен сопровождается снижением энергозатрат на обработку в 1,19 раза. При использовании кругов из изометрических зёрен ($K_ф \approx 1,85$) они на 10 % больше, чем у обычных инструментов ($K_ф \approx 2,74$), а при использовании кругов из игольчато-пластинчатых зёрен ($K_ф \approx 3,31$) – меньше на 7 %.

Совместный анализ результатов оценки энергозатрат при эксплуатации кругов из зёрен с контролируемой формой марок 53CF54 и 13AF30 (п. 5.2.3) показывает, что характер полученных зависимостей определяется опережающим ростом режущей способности шлифовальных кругов при увеличении коэффициентов формы использованных зёрен, по сравнению с изменением мощности рабочих ходов при эксплуатации этих инструментов. Так, при переходе от изометрических к игольчато-пластинчатым зёрнам марки 53CF54 различие мощностей рабочих ходов составляет 4÷9 %, а производительность обработки увеличивается на 14÷45 % в зависимости от схемы шлифования. Такие результаты предопределяются превышением величин мощностей холостого хода на шпинделях шлифовального оборудования и мощностей, затрачиваемых на вращение заготовок (при круглом врезном шлифовании) над мощностями, потребляемыми на резание.

В связи с этим, увеличение режущей способности инструментов и сокращение машинного времени посредством увеличения коэффициентов формы используемых зёрен (п. 5.2.1 и п. 5.3.1), независимо от схемы шлифования, марки и зернистости абразива, приводит к снижению энергозатрат. Результаты также показывают, что схема круглого врезного шлифования в 15÷17 раз менее энергоэффективна, чем схема с постоянным усилием прижатия заготовок.

5.3.4 Шероховатость обрабатываемых поверхностей после шлифования кругами из зёрен 53CF54 с заданной формой

Исследования шероховатости обрабатываемых поверхностей кругами с контролируемой формой зёрен марки 53CF54 наиболее важны в рассматривае-

мом случае для оценки качества поверхностей из всех методов исследований, применённых в представленной работе. Обусловлено это тем, что использованный здесь абразив, как по марке, так и по номеру зернистости характерен для чистовых операций шлифования. В то же время, анализ теплонапряжённости процесса резания кругами из зёрен 53CF54 по размерам зон термического влияния с цветами побежалости, показал аналогичную качественную картину, что и при испытаниях кругов из зёрен марки 13AF30 (п. 5.2.4). С увеличением коэффициента формы зёрен в кругах теплонапряжённость процесса резания снижается. При этом, за счёт более выраженной игольчато-пластинчатой формы зёрен карбида кремния и повышенной скорости шлифования, размеры зон термического влияния были меньше, чем у кругов из зёрен 13AF30.

Исследования влияния формы зёрен на шероховатость обрабатываемых поверхностей заготовок, разрезанных кругами с контролируемой формой зёрен с характеристиками Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с производились по аналогичному алгоритму, что и при испытании опытных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с (п. 5.2.4). Отличие здесь, помимо использования в инструментах зёрен другой марки и зернистости, заключалось также в том, что испытываемые круги были армированы стеклосетками и их рабочая скорость при испытаниях составляла не 50 м/с, как в предыдущем случае (п. 5.2.3.), а 80 м/с. Всё остальное осуществлялось аналогичным образом. Разрезка заготовок (труб 21,3×2,8 из стали 10) производилась при схеме круглого врезного шлифования с постоянной поперечной подачей кругов 0,084 мм/об и частотой вращения заготовок 31,5 об/мин. Измерения шероховатости по параметру R_a производились на профилографе-профилометре «Talysurf 5-120». Для каждого коэффициента формы зёрен исследовалось по четыре заготовки, разрезанных инструментами из этих зёрен. Шероховатость измерялась на торцевых поверхностях тех частей заготовок, которые после отрезки оставались закреплёнными в патроне станка. На каждой заготовке снималось по 12 измерений на участках торцевых поверхностей, равномерно распределённых по окружности разрезанных труб через 30°.

Полученные результаты, отражающие влияние коэффициента формы зёрен марки 53CF54 на шероховатость обработанных поверхностей, представлены в виде диаграммы на рисунке 5.24. Их анализ, совместно с результатами испытаний шлифовальных кругов из зёрен марки 13AF30 (рисунок 5.18) показывает, что, независимо от марки и зернистости абразива, использованного в шлифовальных кругах, прослеживается общий характер влияния формы зёрен на шероховатость обрабатываемых поверхностей. Он выражается в том, что с повышением коэффициентов формы шлифовальных зёрен и, соответственно, с ростом их передних углов, происходит увеличение микронеровностей обрабатываемых поверхностей.

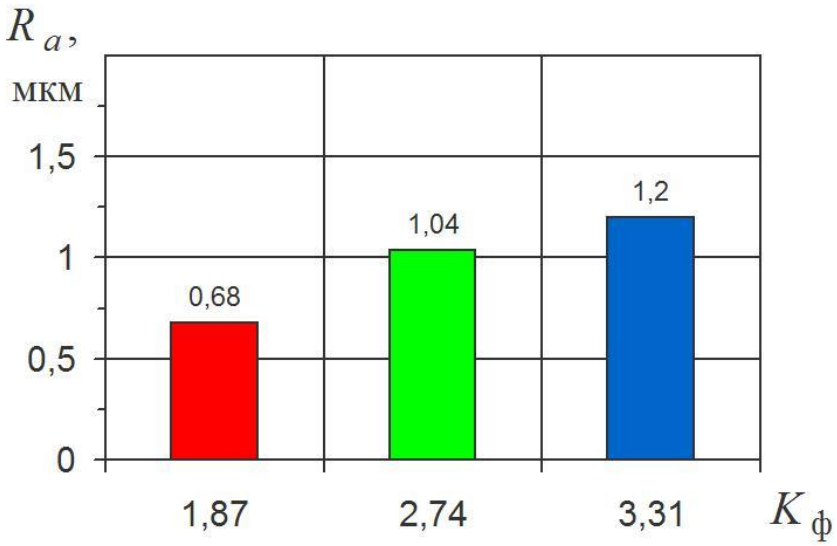


Рисунок 5.24 – Зависимость шероховатости обработанных поверхностей (R_a) от коэффициента формы зёрен ($K_ф$) после обработки по схеме круглого врезного шлифования кругами Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с

Так, при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам шероховатость обрабатываемых поверхностей здесь увеличивается в 1,8 раза. При использовании зёрен игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈3,31) шероховатость поверхностей увеличилась на 15,4 % по сравнению с вариантом применения в шлифовальных кругах обычных зёрен, не упорядоченных по форме ($K_ф$≈2,74). Использование зёрен изометрической формы

($K_ф$≈1,87), напротив, позволяет снизить шероховатость обрабатываемых поверхностей на 35 %.

Выявленная зависимость шероховатости обработанных поверхностей от коэффициента формы зёрен 53CF54 в шлифовальных кругах (рисунок 5.24) выражается следующей степенной математической моделью:

$$R_a = 0{,}353 \cdot K_ф^{1{,}027}; \qquad R^2 = 0{,}85 \qquad (5.21)$$

Сравнение результатов испытаний шлифовальных кругов из зёрен 53CF54 (рисунок 5.24) и 13AF30 (рисунок 5.18) также показывает, что уменьшение размера абразивных частиц примерно в два раза, совместно с увеличением скорости шлифования с 50 м/с до 80 м/с, при сохранении величин подач кругов и частот вращения заготовок, ожидаемо приводит к снижению шероховатости обрабатываемых поверхностей в 3,2÷3,5 раза для кругов из близких разновидностей форм зёрен.

Дополнительно следует отметить, что применение зёрен изометрической формы ($K_ф$≈1,87) марки 53CF54 позволяет получить на операции отрезки уровень шероховатости (R_a=0,68 мкм), удовлетворяющий требованиям чистовой обработки (R_a=0,8 мкм) без применения зёрен более мелких зернистостей, что, как известно, сопряжено с повышением износа инструментов [164, 165].

Из этого следует, что применение изометрических зёрен более крупных зернистостей позволяет обеспечить уровень шероховатости, как у инструментов из зёрен меньшего размера и, при этом, обеспечить двойной эффект повышения стойкости кругов, как за счёт увеличения зернистости абразива, так и за счёт повышенной прочности изометрических зёрен по сравнению с зёрнами той же марки и зернистости, но не упорядоченными по форме (пп. 2.7, 5.2.2, 5.3.2).

Итоги проведённых исследований (пп 5.2, 5.3) ещё раз подтвердили, что для операций шлифования, где приоритетным является достижение минимальной шероховатости поверхностей, целесообразно использовать в шлифовальных кругах зёрна изометрической формы, что дополнительно подтверждается результатами испытаний опытных кругов с контролируемой формой зёрен на операции круглого внутреннего шлифования [302].

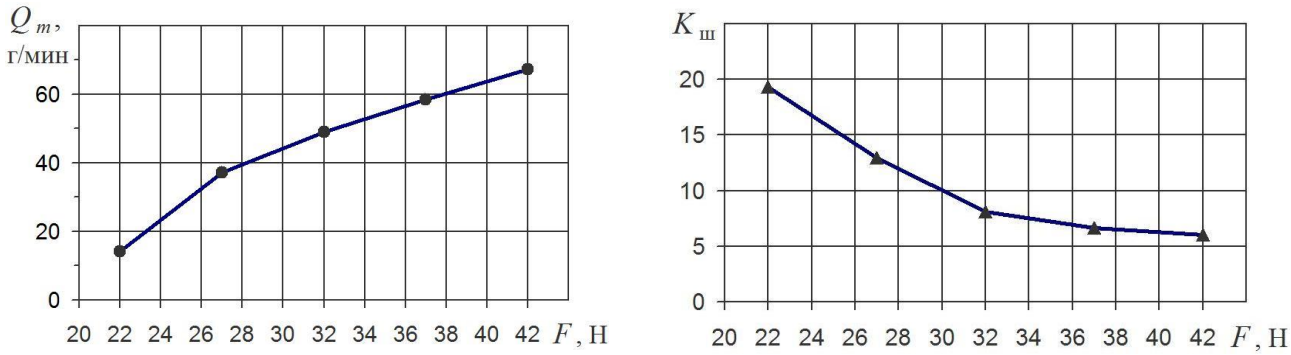
5.4 Исследование эксплуатационных показателей шлифовальных кругов повышенной прочности с заданной формой зёрен у посадочного отверстия

В данном разделе представлены результаты испытаний экспериментальных отрезных кругов Тип 41 230×3×22 13AF30 / 53CF54 [$K_ф$] S BF 90 м/с (Тип 41 230×3×22 13A63H / 53C32H [$K_ф$] Т2 БУ 90 м/с), у которых рабочая часть изготовлена из обычных шлифовальных зёрен марки 13AF30 ($K_ф$≈2,46), а зона у посадочного отверстия выполнена из зёрен марки 53CF54 с контролируемой формой. В частности, для проведения исследований изготовлены отрезные круги, у которых зона у посадочного отверстия выполнена: из зёрен изометрической формы ($K_ф$≈1,87), зёрен промежуточной формы ($K_ф$≈2,74) и зёрен игольчато-пластинчатой формы ($K_ф$≈3,31). Кроме того, в качестве сравнительного эталона, в тех же условиях и за один технологический цикл изготовлены круги, целиком состоящие из зёрен марки 13AF30, не подвергнутых сепарации ($K_ф$≈2,46). Применение в зоне у посадочного отверстия отрезных кругов зёрен игольчато-пластинчатой формы позволило повысить их прочность и, пропорционально ей, максимальную рабочую скорость с 80 до 90 м/с (гл. 3, 4). В связи с этим, целью проводимых исследований являлось установить степень влияния повышения прочности (рабочей скорости) кругов на их режущую способность, коэффициент шлифования и эффективную мощность резания. Поэтому в процессе испытаний скорость шлифования дискретно изменяли от 60 до 90 м/с при сохранении постоянного усилия прижатия заготовок к инструменту. Исследовалось также качество поверхностей заготовок, обработанных на разных скоростях (микротвёрдость и микроструктура металла вблизи плоскости отрезки).

5.4.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности шлифовальных кругов повышенной прочности

Поиск режимов резания состоял в нахождении рационального усилия прижатия заготовки к кругу при рабочей скорости 80 м/с. В качестве заготовок

использовались трубы 21,3×2,8 из конструкционной стали марки 10. Полученные результаты отражены на графиках зависимостей режущей способности (рисунок 5.25, *а*) и коэффициента шлифования отрезных кругов (рисунок 5.25, *б*) от усилия прижатия заготовки к кругу.



а) *б)*

Рисунок 5.25 – Зависимость режущей способности кругов (*а*) и коэффициента шлифования (*б*) от усилия прижатия заготовки к кругу

Анализ представленных зависимостей, а также наличия засаливания или неравномерного износа инструментов при рассматриваемых режимах обработки позволили установить, что рациональное усилие прижатия заготовок к кругам в данном случае составляет F=32 Н.

Повышение прочности шлифовальных кругов за счёт применения в зоне у посадочного отверстия зёрен с упорядоченной формой позволило увеличить максимальную рабочую скорость отрезных кругов с армирующими элементами с 80 до 90 м/с (гл. 4). Вследствие этого, при проведении испытаний оценивалась режущая способность кругов на различных рабочих скоростях. С целью получения достоверных результатов и построения соответствующих зависимостей, скорость кругов дискретно изменяли в более широких пределах, от 60 до 90 м/с. Испытания проводились на выбранных режимах резания, оборудовании и заготовках (п. 5.1.2.). Полученные экспериментальные данные представлены в виде графика зависимости режущей способности кругов от их рабочей скорости (рисунок 5.26).

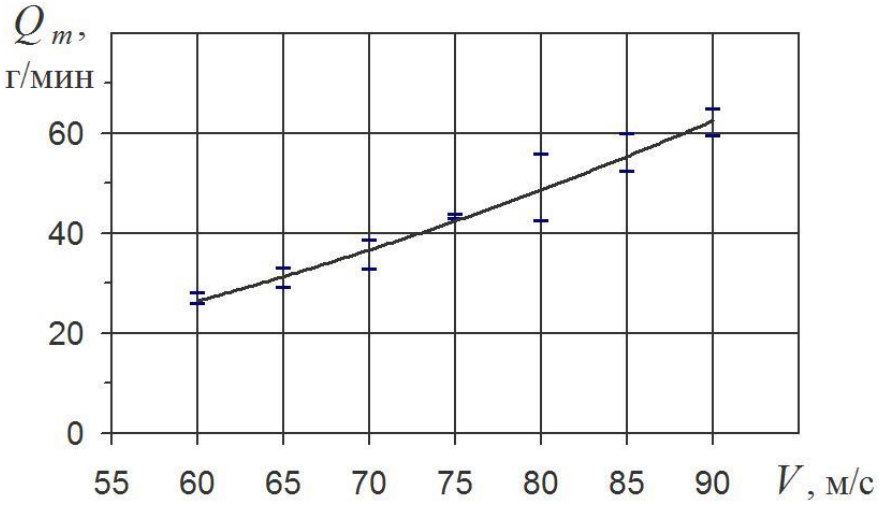


Рис. 5.26. Зависимость режущей способности отрезных кругов (Q_m) от рабочей скорости (V)

Анализ данных (рисунок 5.26) показывает, что рабочая скорость существенно влияет на режущую способность отрезных шлифовальных кругов. В частности, из графика следует, что переход от рабочей скорости 60 м/с к скорости 90 м/с сопровождается увеличением режущей способности кругов в 2,3 раза, а рост рабочей скорости с 80 до 90 м/с увеличивает режущую способность отрезных кругов на 26,5 %. Полученная зависимость выражается степенной моделью следующего вида:

$$Q_m = 0{,}005 \cdot V^{2{,}119}; \qquad R^2 = 0{,}96 \qquad (5.22)$$

Основным фактором, вызывающим рост режущей способности при увеличении рабочей скорости отрезных кругов, является увеличение числа шлифовальных зёрен, проходящих через зону резания в единицу времени. Полученные результаты коррелируют как с собственными исследованиями [118, 119, 127], так и с исследованиями других авторов в области изучения влияния скорости резания на режущую способность шлифовальных инструментов [164, 187, 258].

5.4.2 Коэффициент шлифования и эффективная мощность резания шлифовальных кругов повышенной прочности, энергозатраты на обработку

В процессе испытаний скорость опытных кругов дискретно изменяли в

пределах от 60 до 90 м/с, применяя выбранную методику испытания с постоянной $P_у$ (п. 5.1.1.), оборудование и заготовки (п. 5.1.2.). Полученные результаты, отражающие зависимость коэффициента шлифования отрезных кругов от их рабочей скорости, представлены в виде графика на рисунке 5.27.

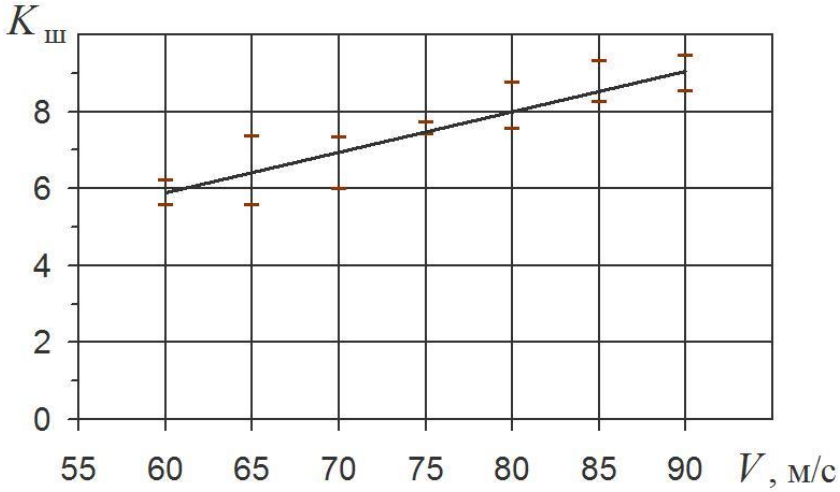


Рисунок 5.27. – Зависимость коэффициента шлифования отрезных кругов ($K_ш$) от их рабочей скорости (V)

Анализ экспериментальных данных показывает, что при увеличении рабочей скорости повышается коэффициент шлифования отрезных кругов. Так, при переходе от рабочей скорости 60 м/с к скорости 90 м/с коэффициент шлифования отрезных кругов увеличивается в 1,53 раза. Рост рабочей скорости с 80 до 90 м/с увеличивает коэффициент шлифования отрезных кругов на 10,9 %. Установленная взаимосвязь коэффициента шлифования с рабочей скоростью отрезных кругов (рисунок 5.27) выражается линейной зависимостью вида:

$$K_ш = 0{,}105 \cdot V - 0{,}431; \qquad R^2 = 0{,}84 \qquad (5.23)$$

Причинами повышения коэффициента шлифования отрезных кругов при переходе на более высокие рабочие скорости, является снижение их износа, обусловленное уменьшением нагрузок на шлифовальные зёрна.

Оценка эффективной мощности резания опытных отрезных кругов при различных рабочих скоростях проводилась одновременно с оценкой их режущей способности и коэффициентов шлифования. Испытания проводились при

установленном рациональном усилии прижатия заготовки к кругу на испытательном комплексе (п. 5.1.2.), с использованием заготовок типа труб 21,3×2,8 из стали 10. Полученные результаты представлены на графике (рисунок 5.28).

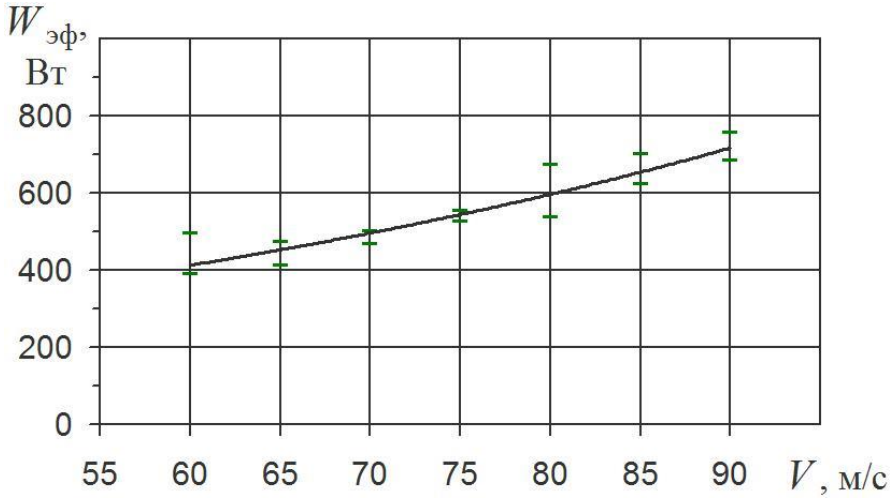


Рисунок 5.28 – Зависимость эффективной мощности резания ($W_{эф}$) от рабочей скорости отрезных кругов (V)

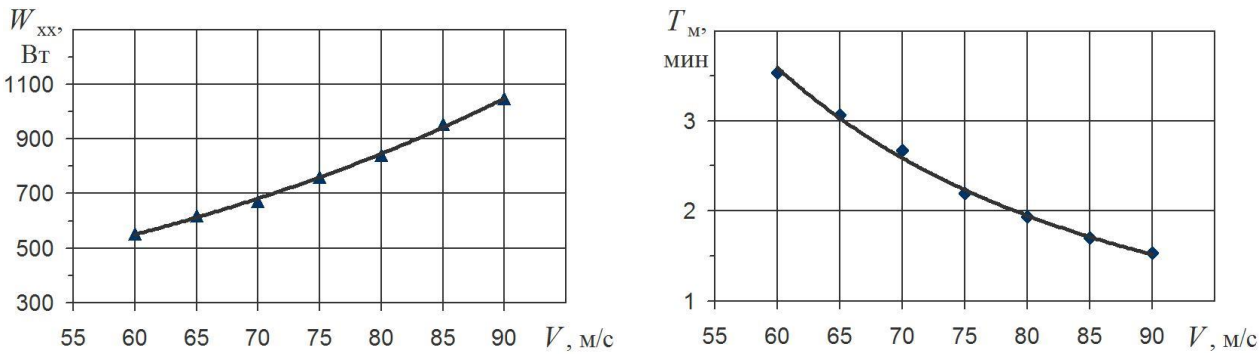
Выявленная зависимость (рисунок 5.28) свидетельствуют о том, что увеличение рабочей скорости кругов повышает эффективную мощность при отрезке. Так, при переходе от рабочей скорости V=60 м/с к V=90 м/с, эффективная мощность резания возрастает в 1,68 раза. По сравнению с рабочей скоростью обычных отрезных кругов (80 м/с), работа опытных кругов повышенной прочности на скорости 90 м/с сопровождается ростом эффективной мощности резания на 17,6 %. Установленная зависимость эффективной мощности резания при работе отрезных шлифовальных кругов от их рабочей скорости выражается экспоненциальной моделью следующего вида:

$$W_{эф} = 136{,}25 \cdot e^{0{,}018 \cdot V}; \qquad R^2 = 0{,}93 \qquad (5.24)$$

Анализ экспериментальных данных показывает, что основной причиной роста эффективной мощности резания при увеличении рабочей скорости отрезных кругов является увеличение числа шлифовальных зёрен, проходящих через зону резания в единицу времени, вследствие чего возрастает результирующая сила резания. Данный вывод дополнительно подтверждается результатами ис-

следований режущей способности отрезных кругов в зависимости от их рабочей скорости (п. 5.4.1.).

Оценка эффективной мощности резания также позволила определить общие затраты электроэнергии при работе отрезных кругов на различных рабочих скоростях. Для определения общих затрат электроэнергии при эксплуатации шлифовальных кругов необходимо знать величины мощностей рабочих ходов, а также продолжительность обработки. Мощности рабочих ходов, в свою очередь, включают эффективные мощности резания (рисунок 5.28) и мощности холостых ходов (рисунок 5.29, *а*). Экспериментальные данные зависимости режущей способности отрезных кругов от их рабочей скорости (п. 5.3.1.), позволяют рассчитать время работы отрезного круга при выполнении заданного объёма работы. На этой основе определено время работы отрезных кругов при осуществлении на разных рабочих скоростях 25-и резов трубы (срезаемая масса металла составляет ≈ 95 г). Полученная зависимость представлена в виде графика на рисунке 5.29, *б*. Известные величины мощностей рабочих ходов, а также времени работы отрезных кругов позволили определить общие затраты электроэнергии при осуществлении 25-и резов трубы 21,3×2,8 из стали 10 на каждой сравниваемой рабочей скорости. Результаты по оценке энергозатрат при различных рабочих скоростях отрезных кругов представлены на графике (рисунок 5.30).



а) *б)*

Рисунок 5.29 – Зависимость мощности холостых ходов W_{xx} (*а*) и машинного времени $T_м$ (*б*) при 25-и кратной отрезке трубы 21,3×2,8 из стали 10 от рабочей скорости кругов (V)

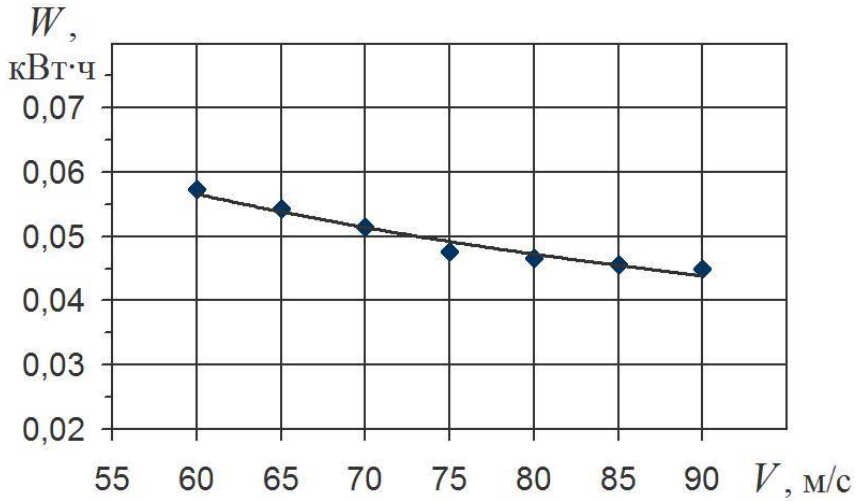


Рисунок 5.30 – Энергозатраты (*W*) при 25-и кратной отрезке трубы 21,3×2,8 из стали 10 при различных рабочих скоростях кругов (*V*)

Из зависимости, представленной на рисунке 5.30 следует, при переходе от рабочей скорости *V*=60 м/с к *V*=90 м/с, затраты электроэнергии снижаются в 1,28 раза. Наименьшие затраты электроэнергии характеризуют работу отрезных кругов на скорости 90 м/с. Здесь энергозатраты на 3,8 % меньше, чем на рабочей скорости обычных отрезных кругов (80 м/с).

Основная причина, определяющая характер выявленной зависимости состоит в том, что весьма значительно сокращается время отрезки заготовок (в 2,3 раза) при увеличении рабочей скорости отрезных шлифовальных кругов с 60 до 90 м/с. При этом мощность рабочих ходов возрастает не столь значительно – в 1,8 раза, что также говорит об улучшении условий работы зёрен и уменьшения деформаций ими обрабатываемого материала.

Полученные данные коррелируют с результатами исследований [164], где выявлено, что на ряде машиностроительных предприятий при модернизации шлифовального оборудования и переходе на повышенные скорости резания, несмотря на возросшие единовременные затраты электроэнергии, ввиду существенного сокращения времени операций шлифования, в целом, зафиксирована экономия энергоресурсов.

5.4.3 Температура при резании, микротвёрдость и микроструктура заготовок после обработки кругами повышенной прочности

Для определения температур вблизи плоскости отрезки при работе опытных отрезных кругов Тип 41 230×3×22 13AF30 / 53CF54 [$K_ф$] S BF 90 м/с (Тип 41 230×3×22 13А63Н / 53С32Н [$K_ф$] Т2 БУ 90 м/с) повышенной прочности с контролируемой формой зёрен у посадочного отверстия был применён способ, основанный на анализе цветов побежалости на поверхности металла. Способ позволяет устанавливать не только распределение температур, но и глубину зоны термического влияния в продольном и поперечном направлениях относительно плоскости резания. Для проведения исследований в качестве заготовок использовались трубы 21,3×2,8 из стали 10. Испытания проводились на испытательном комплексе (п. 5.1.2.), усилие прижатия заготовки составляло 32 Н, а скорость резания дискретно изменялась в пределах 60÷90 м/с.

Первоначально, для получения общего представления о процессах, происходящих в зоне резания, визуально оценивались торцы труб, обработанных на разных рабочих скоростях. Установлено, что с увеличением рабочей скорости кругов уменьшается зона термического влияния, фиксируемая по цветам побежалости. Кроме того, снижаются пластические деформации обрабатываемого материала, т.е. в среднем, уменьшаются наплывы металла в местах выхода отрезного круга из заготовки. Из этого сделан предварительный вывод о том, что с увеличением рабочей скорости кругов общая теплонапряженность в зоне отрезки снижается. С целью уточнения выявленной зависимости, в дальнейшем, более детально исследовались образцы труб, разрезанные при рабочих скоростях 70, 80 и 90 м/с. Внешний вид торцов труб, разрезанных отрезными кругами повышенной прочности на данных рабочих скоростях, представлен на рисунке 5.31, *А*, а изображения труб вдоль их оси показаны на рисунке 5.31, *Б*.

Анализ изображений заготовок (рисунок 5.31, *Б*) в графическом редакторе «Paint» позволил установить с помощью каталога цветов побежалости характерные температурные зоны в зависимости от их удаления от зоны резания.

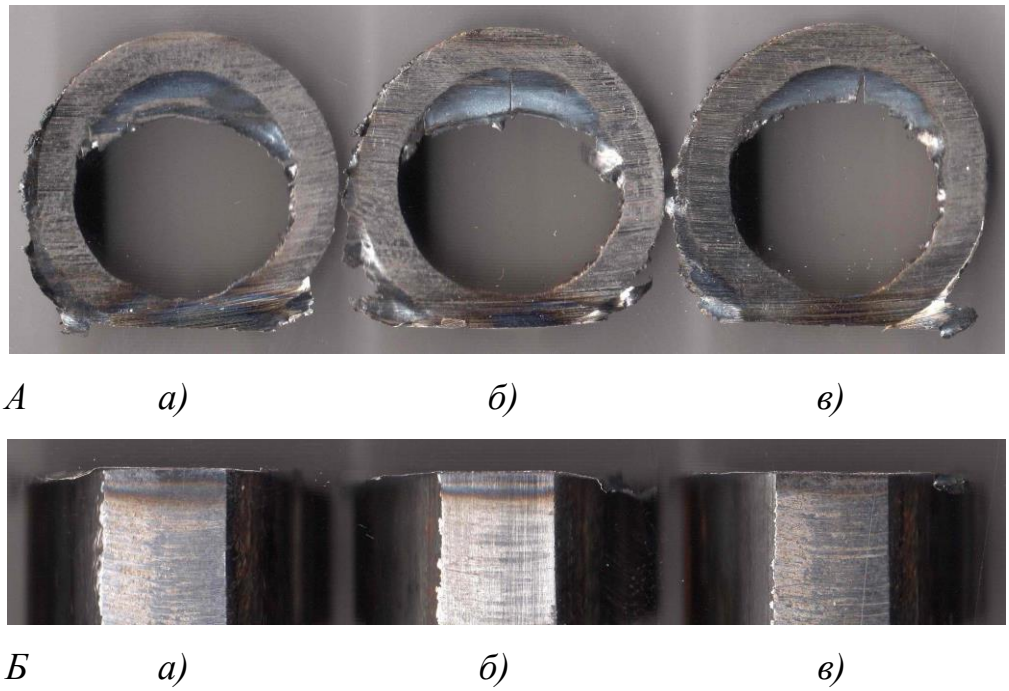


Рисунок 5.31 – Виды торцов труб (*А*) и труб в продольном направлении (*Б*), разрезанных отрезными кругами повышенной прочности на различных скоростях: *а)* *V*=70 м/с; *б)* *V*=80 м/с; *в)* *V*=90 м/с

Полученные данные дали возможность построить графические зависимости температуры металла на различном удалении от плоскости отрезки при работе кругами на разных скоростях (рисунок 5.32).

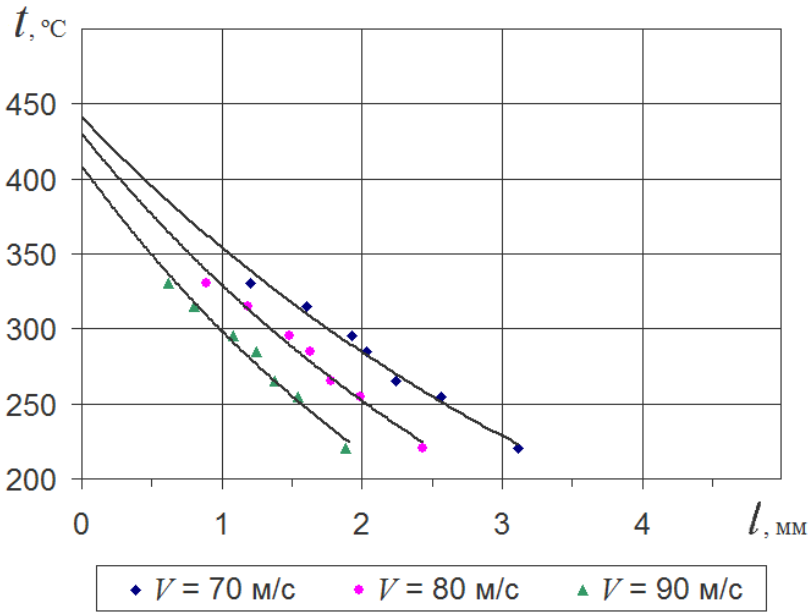


Рисунок 5.32 – Температура нагрева металла на различном удалении от плоскости отрезки при работе кругами на разных скоростях

Кривые, представленные на рисунке 5.32, выражаются следующими экспоненциальными моделями:

V=70 м/с : $t = 440{,}72 \cdot e^{-0{,}219 \cdot l}$; R^2=0,98 (5.25)

V=80 м/с : $t = 429{,}96 \cdot e^{-0{,}267 \cdot l}$; R^2=0,98 (5.26)

V=90 м/с : $t = 408{,}64 \cdot e^{-0{,}314 \cdot l}$; R^2=0,98 (5.27)

Полученные результаты показывают, что рабочая скорость отрезных кругов оказывает весомое влияние на степень нагрева металла вблизи зоны резания, при этом, с увеличением скорости шлифования общая теплонапряжённость процесса снижается. Непосредственно в зоне резания разница в нагреве металла при работе кругами на разных скоростях относительно невелика и составляет 11÷32 °С, а чем дальше от зоны обработки, тем она возрастает и достигает, например, на расстоянии 1,5 мм от плоскости отрезки 29÷62 °С. Среди сравниваемых скоростей, наибольшая глубина прогрева металла, фиксируемая по цветам побежалости, характеризует обработку при V=70 м/с и составляет 3,1 мм от плоскости отрезки. И наоборот, меньше всего металл прогревается при рабочей скорости круга V=90 м/с. Здесь визуально фиксируемая зона термического влияния имеет максимальную глубину порядка 1,9 мм. Следует отметить, что чем выше скорость резания, тем круче наклон температурных кривых (рисунок 5.32). Объясняется это тем, что с повышением рабочей скорости отрезных кругов уменьшается деформация металла и, как следствие, количество выделяющегося тепла.

Для выяснения того, как влияет наблюдаемая разница в нагреве заготовок при их отрезке на разных скоростях на структуру и твёрдость обрабатываемого металла изучалась микротвёрдость и микроструктура материала заготовок вблизи зоны резания. Для этого из образцов труб, обработанных на разных скоростях, были изготовлены шлифы. Исследования микротвёрдости осуществлялись на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1 Н. Здесь на каждом образце первые два измерения проводились на удалении 0,05 и 0,1 мм от края реза, а последующие – через 0,1 мм на максимальное удаление 1,0 мм. Результаты измерений микротвёрдости представлены в виде графиков на рисунке 5.33.

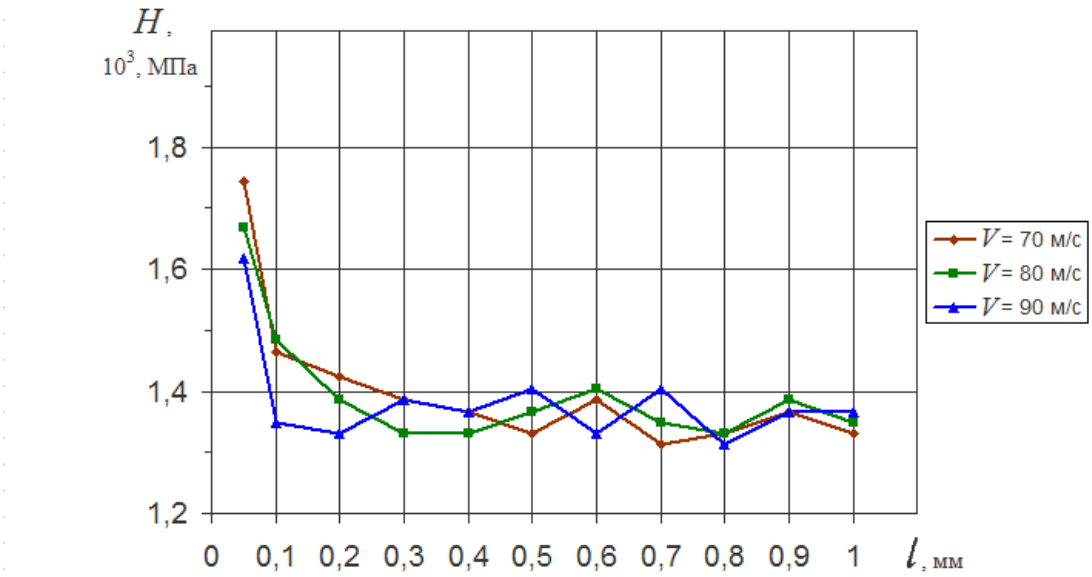
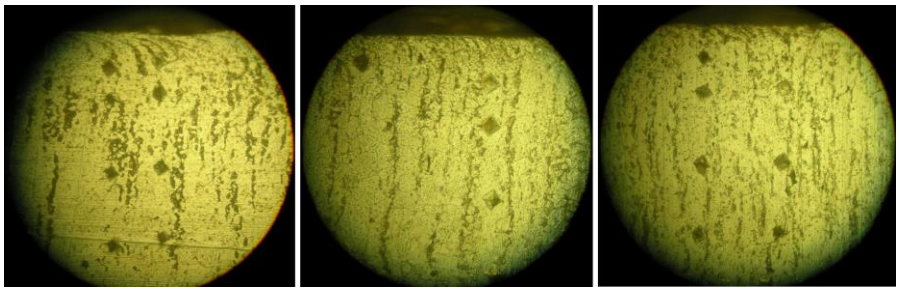


Рисунок 5.33 – Микротвёрдость образцов, разрезанных кругами при разных скоростях, на различном удалении от зоны резания

Полученные данные свидетельствуют о том, что вблизи плоскости отрезки у всех образцов имеется поверхностное упрочнение (наклёп), обусловленный пластической деформацией металла, характерной для процесса шлифования. При этом, зафиксировано, что величина и глубина зоны поверхностного упрочнения уменьшаются с увеличением скорости обработки. Объясняется это тем, что с увеличением рабочей скорости кругов уменьшается степень деформации металла, время отрезки и улучшаются условия работы единичных зёрен.

Вместе с тем, в процессе исследования образцов, разрезанных при различных скоростях, не выявлено снижения микротвёрдости металла по сравнению с его исходным состоянием. Данный результат дополнительно говорит о том, что в процессе резания на всех сравниваемых рабочих скоростях критические температуры появления изменения или дефектов структуры не превышались. В противном случае произошёл бы рекристаллизационный отжиг наклёпанного слоя, а при более высоких температурах было бы возможно появление шлифовочных трещин. Указанный вывод подтверждается при изучении микроструктуры образцов на стереомикроскопе ЛОМО МЕТАМ Р-1 после травления (рисунок 5.34).



а) *б)* *в)*

Рисунок 5.34 – Микроструктура металла в образцах после отрезки при разных рабочих скоростях: *а) V*=70 м/с; *б) V*=80 м/с ; *в) V*=90 м/с

Из полученных на микроскопе фотографий (рисунок 5.34) видно, что все образцы, разрезанные при различных рабочих скоростях, имеют характерную феррито-перлитную структуру. Дефектного изменения структуры не наблюдается. Отчётливо фиксируется зона поверхностного упрочнения, причём наиболее явно она выражена у образца, обработанного отрезным шлифовальным кругом при скорости *V*=70 м/с, а наименее явно – обработанного при *V*=90 м/с.

Таким образом, оценив в комплексе результаты исследований, можно сделать вывод о том, что для тех случаев отрезки и тех деталей, для которых важно уменьшение температуры резания, целесообразно использовать круги повышенной прочности при максимально возможных рабочих скоростях.

5.5 Взаимосвязь эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с величинами передних углов и прочностью шлифовальных зёрен

Анализ представленных моделей (5.4÷5.21) говорит о том, что марка абразивного материала, зернистость и схема шлифования кардинально не меняют характер воздействия формы зёрен на работоспособность шлифовальных кругов, который во всех случаях остаётся практически неизменным.

Так, с ростом коэффициента формы зёрен увеличиваются напряжения в них при работе, уменьшается их прочность и стойкость (пп. 2.6÷2.8) и, как следствие, возрастает износ шлифовальных инструментов. Полученные зависимости усилия разрушения зёрен 13AF30 от коэффициента формы при различных вариантах их ориентации (2.39÷2.43) позволили установить взаимосвязь

коэффициента шлифования у кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с с усилием разрушения зёрен ($P_р$) из которых они изготовлены, с учётом хаотичного (равновероятного) расположения зёрен в инструменте:

P_y=const $$K_ш = 21{,}322 \cdot (0{,}009 \cdot P_р)^{0{,}436};$$ (5.28)

$S_{круга}$=const $$K_ш = 62{,}713 \cdot (0{,}009 \cdot P_р)^{0{,}540};$$ (5.29)

Совместный анализ результатов оценки передних углов (γ) шлифовальных зёрен с различными коэффициентами формы (глава 2, модели 2.11÷2.12) и эксплуатационных показателей шлифовальных кругов, изготовленных из этих зёрен, показал, что величины передних углов зёрен непосредственно влияют на режущую способность, эффективную мощность, максимальную температуру шлифования кругами и шероховатость обрабатываемых поверхностей. При увеличении коэффициентов формы зёрен их передние углы становятся больше и, как следствие, увеличивается режущая способность шлифовальных инструментов, снижаются деформации металла и температуры резания, увеличивается шероховатость обрабатываемых поверхностей.

Анализ полученных данных, а также математических моделей (2.11÷2.12) и (5.4÷5.21) позволил установить зависимости указанных эксплуатационных показателей кругов от передних углов зёрен (таблица 5.1, модели (5.30÷5.41)).

Таблица 5.1

Характеристика круга и схема шлифования	Эксплуатационные показатели кругов	
	Режущая способность Q_m, (г/мин)	Эффективная мощность $W_{эф}$, (Вт)
13AF30 Q B 50 м/с шлифование с P_y=const	$Q_m = 4{,}084 \cdot e^{0{,}451 e^{\left(\frac{(\gamma+83{,}971)}{25{,}944}\right)}}$; (5.30)	$W_{эф} = 65{,}088 \cdot e^{0{,}611 e^{\left(\frac{(\gamma+83{,}971)}{25{,}944}\right)}}$; (5.34)
13AF30 Q B 50 м/с круглое врезное шлифование с $S_{круга}$=const	$Q_m = 1{,}668 \cdot e^{0{,}249 e^{\left(\frac{(\gamma+83{,}971)}{25{,}944}\right)}}$; (5.31)	$W_{эф} = 335{,}49 \cdot e^{-0{,}330 e^{\left(\frac{(\gamma+83{,}971)}{25{,}944}\right)}}$; (5.35)
53CF54 Q BF 80 м/с шлифование с P_y=const	$Q_m = 2{,}011 \cdot e^{0{,}153 e^{\left(\frac{(\gamma+82{,}136)}{23{,}966}\right)}}$; (5.32)	$W_{эф} = 392{,}3 \cdot e^{0{,}146 e^{\left(\frac{(\gamma+82{,}136)}{23{,}966}\right)}}$; (5.36)
53CF54 Q BF 80 м/с круглое врезное шлифование с $S_{круга}$=const	$Q_m = 1{,}960 \cdot e^{0{,}089 e^{\left(\frac{(\gamma+82{,}136)}{23{,}966}\right)}}$; (5.33)	$W_{эф} = 579{,}06 \cdot e^{-0{,}499 e^{\left(\frac{(\gamma+82{,}136)}{23{,}966}\right)}}$; (5.37)

Зависимости шероховатости обрабатываемых поверхностей от передних углов зёрен 13AF30 и 53CF54, использованных в шлифовальных кругах Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с и Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с при обработке по схеме круглого врезного шлифования с постоянной подачей инструмента имеют следующий вид:

13AF30 Q B 50 м/с: $$R_a = 1{,}145 \cdot e^{1{,}167 \cdot \left(\frac{(\gamma + 83{,}971)}{25{,}944}\right)};$$ (5.39)

53CF54 Q BF 80 м/с: $$R_a = 0{,}353 \cdot e^{1{,}027 \cdot \left(\frac{(\gamma + 82{,}136}{23{,}966}\right)};$$ (5.40)

Взаимосвязь максимальных температур с передними углами зёрен 13AF30 при работе кругов Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с по схеме с постоянным усилием прижатия заготовок выражается следующей зависимостью:

13AF30 Q B 50 м/с: $$t_{max} = 258{,}265 - 2{,}873 \cdot \gamma;$$ (5.41)

В целом, проведённые испытания и анализ их результатов показали, что эксплуатационные показатели шлифовальных кругов могут быть существенно улучшены путём подбора и упорядочения формы используемых зёрен. При этом целесообразно учитывать характер выявленных зависимостей и выводы, полученные в представленной работе.

5.6 Выводы по главе 5

1. Разработана методика проведения испытаний опытных отрезных кругов, основанная на использовании схемы обработки с постоянным усилием прижатия заготовки к кругу и схемы круглого врезного шлифования. Проведены сравнительные испытания опытных отрезных шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и с характеристиками:

Тип 41 230×3×32 13AF30 [$K_ф$] Q B 50 м/с

Тип 41 230×3×22 53CF54 [$K_ф$] Q BF 80 м/с

При проведении данных испытаний оценивались следующие эксплуата-

ционные параметры этих инструментов: режущая способность, коэффициент шлифования, эффективная мощность резания и качество отрезки заготовок, оцениваемое по теплонапряженности процесса шлифования, по изменению микротвердости и микроструктуры металла вблизи плоскости отрезки, по шероховатости обработанных поверхностей.

2. Установлено, что при переходе от изометрических шлифовальных зёрен к зёрнам игольчато-пластинчатой формы режущая способность отрезных кругов из зёрен различных марок и зернистостей возрастает в 1,14÷1,51 раза в зависимости от марки абразива, схемы резания и скорости шлифования. Установленная взаимосвязь выражается экспоненциальными зависимостями (5.4÷5.5) и (5.15÷5.16). При этом, режущая способность кругов из зёрен изометрической формы на 8÷22,6 % ниже, а из зёрен игольчато-пластинчатой формы – на 5,2÷19 % выше, чем у обычных инструментов из исходных зёрен, не разделенных по форме. Кроме того, при схеме резания с постоянным усилием прижатия заготовок различие в режущей способности шлифовальных кругов из зёрен разной формы существенно больше, чем при схеме резания с постоянной подачей инструмента. Сравнение схем шлифования также показывает, что производительность обработки при постоянном усилии прижатия заготовок в 3,5÷9 раз выше, чем при круглом врезном шлифовании.

3. Основной причиной роста режущей способности отрезных кругов при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам является то, что игольчатые зёрна имеют большие передние углы по сравнению с зёрнами изометрической формы. Соответственно, чем острее режущий клин шлифовальных зёрен, тем лучше они внедряются в обрабатываемую поверхность и тем меньше деформируют обрабатываемый материал. Кроме того, чем выше коэффициент формы зёрен, тем большее их число находится в единице насыпного объёма абразива и в объёме инструмента. Поэтому отрезные круги из зёрен с высокими значениями коэффициентов формы имеют большее количество режущих кромок на своей рабочей поверхности и режут металл более активно, вызывая меньшие деформации.

4. Установлено, что переход от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам в шлифовальных кругах сопровождается снижением коэффициента шлифования инструментов в 1,45÷1,91 раза в зависимости от марки и зернистости абразива, схемы и скорости резания. Причем, коэффициент шлифования кругов из зёрен изометрической формы на 25÷45,4 % выше, а из зёрен игольчато-пластинчатой формы – на 13,5÷24,3 % ниже, чем у обычных кругов из исходных, неразделенных по форме зёрен. Данная взаимосвязь выражается степенными зависимостями (5.6÷5.7) и (5.17÷5.18). Сравнение коэффициентов шлифования кругов при различных схемах резания показывает, что при постоянной подаче кругов данный показатель в 2,1÷2,4 раза выше, чем при постоянном усилии прижатия заготовок к кругам.

5. Причиной снижения коэффициента шлифования у кругов с игольчато-пластинчатыми зёрнами являются повышенные напряжения в таких зёрнах при работе, их меньшая прочность и стойкость. Круги из изометрических зёрен, наоборот, изнашиваются медленно, благодаря пониженному уровню напряжений в зёрнах, повышенной прочности и стойкости зёрен.

6. Установлено, что при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам при схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок эффективная мощность резания и составляющая силы резания P_z. возрастают в 1,26÷1,79 раза в зависимости от марки и зернистости абразива, а также скорости резания. При этом, соотношение составляющих силы резания P_y/P_z пропорционально уменьшается. По сравнению с отрезными кругами из исходных зёрен, не упорядоченных по форме, у кругов из изометрических зёрен отмечается снижение эффективной мощности резания на 9,2÷22,8 %, а у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен – её повышение на 14,1÷38,1 %. Данная зависимость выражается экспоненциальными математическими моделями (5.8) и (5.19). Полученные результаты объясняются тем, что зёрна игольчато-пластинчатой формы характеризуются большими передними углами, меньше деформируют металл и снимают стружки большего сечения при постоянном усилии прижатия заготовок (P_y=const), повышая тем

самым эффективную мощность резания. Зёрна изометрической формы, напротив, ввиду меньших величин передних углов, вызывают большие деформации обрабатываемого материала, из-за чего при рассматриваемой схеме резания (P_y=const) срезают стружки меньшей толщины, что подтверждается существенным снижением режущей способности инструментов.

7. Установлено, что при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам при схеме с постоянной подачей кругов эффективная мощность резания снижается в 1,38÷2,2 раза в зависимости от марки и зернистости абразива, а также скорости резания. При этом у кругов из изометрических зёрен отмечается повышение эффективной мощности резания на 8,6÷23,6 %, а у кругов из игольчато-пластинчатых зёрен – её уменьшение на 22,5÷44 %. Полученная зависимость выражается экспоненциальными математическими моделями (5.9) и (5.20). Характер выявленных зависимостей обусловлен тем, что зёрна изометрической формы характеризуются малыми величинами передних углов. Круги из таких зёрен обладают повышенной стойкостью, но склонны к засаливанию и при работе вызывают большие деформации материала по сравнению со стандартными инструментами. Соответственно, при постоянной величине подачи инструмента, когда толщины срезаемых стружек практически неизменны и заданы величиной подачи на режущие микроклинья, использование изометрических зёрен приводит к росту эффективной мощности резания. Игольчато-пластинчатые зёрна характеризуются большими передними углами, меньше деформируют металл и при схеме резания с постоянной подачей инструменты из таких зёрен затрачивают меньшую эффективную мощность резания.

8. Установлено, что общие затраты электроэнергии, потребляемой на шлифование, при переходе от зёрен изометрической формы к игольчато-пластинчатым зёрнам снижаются, независимо от схемы резания, марки и зернистости абразива. С увеличением коэффициента формы зёрен энергозатраты уменьшаются в 1,19÷1,32 раза. При использовании в шлифовальных кругах зёрен изометрической формы энергозатраты возрастают на 10÷18 %, а при ис-

пользовании зёрен игольчато-пластинчатой формы – уменьшаются на 2÷11 %, по сравнению с инструментами из зёрен, не упорядоченных по форме. Характер полученных зависимостей определяется опережающим ростом режущей способности шлифовальных кругов при увеличении коэффициентов формы использованных зёрен, по сравнению с изменением мощности рабочих ходов при эксплуатации этих инструментов, независимо от схемы обработки. В свою очередь, не столь значительное изменение мощностей рабочих ходов связано с тем, что мощности холостого хода на шпинделях шлифовального оборудования и мощности, затрачиваемые на вращение заготовок (при круглом врезном шлифовании), больше мощностей, затрачиваемых на резание. Установлено также, что схема круглого врезного шлифования в 15÷17 раз более энергозатратна, чем схема с постоянным усилием прижатия заготовок.

9. Установлено, что с увеличением коэффициента формы зёрен в кругах теплонапряженность процесса резания снижается. При этом непосредственно в зоне резания это снижение относительно невелико (21÷30 °С), а чем дальше от зоны обработки, тем оно становится более значительным и достигает, например, на расстоянии 3 мм от плоскости отрезки 34÷52 °С. Это явление для кругов из зёрен с разной формой описывается экспоненциальными и логарифмическими зависимостями (5.10÷5.13). Глубина прогрева металла при работе кругами с изометрической формой зёрен больше, чем при работе другими инструментами. Меньше всего металл прогревается при использовании кругов с игольчато-пластинчатыми зёрнами. Объяснение этого состоит в том, что с увеличением коэффициента формы шлифовальных зёрен возрастают их передние углы и, как следствие, снижаются деформации обрабатываемого материала и температура в зоне резания. Установлено также, что при использовании в шлифовальных кругах зёрен разной формы, во всех случаях температура не превышает тех значений, при которых возможно появление изменений или дефектов структуры металла (в стали 10).

10. Установлено, что на заготовках вблизи плоскости отрезки в результате применения отрезных кругов из зёрен с контролируемой формой наблюдает-

ся поверхностное упрочнение (наклёп). Наиболее отчетливо зона поверхностного упрочнения видна на образцах, обработанных кругами из изометрических зёрен, наименее явно она просматривается на образцах, обработанных кругами из игольчато-пластинчатых зёрен. Заметной разницы в микротвердости образцов после обработки кругами с разной формой зёрен не обнаружено. Поэтому использование шлифовальных кругов с разной формой зерен на применяемых режимах резания и типе заготовок не вызывает появления дефектов металла вследствие его перегрева. Вместе с тем, для случаев обработки и деталей, где важна пониженная температура резания, целесообразно использовать круги из игольчато –пластинчатых зёрен с большими коэффициентами формы.

11. Установлено, что с увеличением коэффициента формы зёрен в шлифовальных кругах шероховатость обрабатываемых поверхностей возрастает в 1,6÷1,8 раза, в зависимости от марки и зернистости абразива. Использование в инструментах игольчато-пластинчатых зёрен приводит к повышению шероховатости поверхностей на 9,5÷15,4 %, по сравнению с инструментами из обычных зёрен, не упорядоченных по форме. Применение зёрен изометрической формы, напротив, позволяет снизить шероховатость на 32,4÷35 %. Выявленная зависимость шероховатости обработанных поверхностей от коэффициента формы зёрен в шлифовальных кругах выражается логарифмическими моделями (5.14) и (5.21). Характер выявленных зависимостей обусловлен тем, с увеличением коэффициентов формы зёрен возрастают величины их передних углов. Поэтому изометрические зёрна сильнее деформируют и выглаживают обрабатываемую поверхность, а игольчато-пластинчатые зёрна, напротив, срезают металл с меньшими деформациями, оставляя более глубокие риски. Таким образом, для операций шлифования, на которых приоритетным является достижение минимальной шероховатости поверхностей, целесообразно использовать в шлифовальных кругах зёрна изометрической формы с малыми величинами коэффициентов формы. Кроме того, применение зёрен изометрической формы одновременно позволяет повысить стойкость инструментов.

12. Установлено, что при повышении рабочей скорости с 60 до 90 м/с происходит увеличение режущей способности отрезных шлифовальных кругов в 2,3 раза, а при повышении скорости с 80 до 90 м/с прирост режущей способности составляет 26,5 %. Это явление выражается степенной моделью (5.22). Повышение режущей способности шлифовальных кругов по мере возрастания скорости резания является следствием увеличения числа зёрен, проходящих через зону резания в единицу времени.

13. Установлено, что при повышении рабочей скорости с 60 до 90 м/с коэффициент шлифования отрезных кругов увеличивается в 1,53 раза, а рост рабочей скорости с 80 до 90 м/с увеличивает коэффициент шлифования отрезных кругов на 10,9 %. Обусловлено это тем, что с увеличением скорости резания улучшаются условия работы зёрен, снижаются деформации обрабатываемого материала и, как следствие, – уменьшается износ инструментов. Взаимосвязь $K_{ш}$ с рабочей скоростью отрезных кругов выражается линейной моделью (5.23).

14. Установлено, что при увеличении рабочей скорости отрезных шлифовальных кругов с 60 до 90 м/с эффективная мощность резания возрастает в 1,68 раза. Повышение скорости резания с 80 до 90 м/с увеличивает эффективную мощность на 17,6 %. Зависимость $W_{эф}$ от рабочей скорости кругов выражается экспоненциальной моделью (5.24). Характер полученной зависимости определяется существенным ростом режущей способности кругов с увеличением их рабочей скорости. Вместе с тем, благодаря улучшению условий работы зёрен, снижению деформаций обрабатываемого материала, мощность рабочих ходов при увеличении скорости шлифования возрастает не столь значительно (в 1,8 раза), как режущая способность инструментов (в 2,3 раза). Результатом этого является снижение общих энергозатрат в 1,28 раза при увеличении скорости резания с 60 до 90 м/с. При этом, энергозатраты на скорости 90 м/с на 3,8 % меньше, чем при 80 м/с.

15. Установлено, что с увеличением рабочей скорости отрезных шлифовальных кругов общая теплонапряженность в зоне отрезки снижается. На скорости 90 м/с температура в зоне резания на 21 °С меньше, чем при 80 м/с, а на

расстоянии l=1,5 мм от плоскости отрезки она меньше на 33 °С. Это явление описывается экспоненциальными зависимостями (5.25÷5.27). Уменьшение температуры резания при увеличении рабочей скорости отрезных кругов до 90 м/с объясняется снижением величин деформаций при срезании металла на высоких скоростях и, как следствие, уменьшением тепловыделений.

16. Величина и глубина зоны поверхностного упрочнения металла заготовок уменьшаются с увеличением скорости резания. Дефектного изменения структуры металла не наблюдается и на скорости 80 м/с, но более предпочтительную структуру имеют заготовки, обработанные на скорости 90 м/с.

17. Установлена взаимосвязь эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с величинами передних углов и прочностью шлифовальных зёрен. Так, с увеличением коэффициентов формы зёрен снижается их прочность и стойкость, вследствие чего повышается износ шлифовальных инструментов (5.28÷5.29). Совместный анализ результатов оценки передних углов (γ) зёрен с различными коэффициентами формы (глава 2) и эксплуатационных показателей шлифовальных кругов, изготовленных из них, показывает, что с увеличением коэффициентов формы и, соответственно, с увеличением передних углов зёрен повышается режущая способность инструментов (5.30÷5.33) и шероховатость обрабатываемых поверхностей (5.39÷5.40), снижаются деформации металла и температура резания (5.41).

Глава 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ЗАДАННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ЗЁРЕН

В данной главе отражены исследования эксплуатационных показателей опытных шлифовальных кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с (230×3×32 13А40Н [Θ] Т2 Б 50 м/с) с упрочняющими элементами (с УЭ) и кругов без упрочняющих элементов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с (230×4×32 13А40Н [Θ] Т2 БУ 80 м/с) , изготовленных из шлифовальных зёрен, которые в процессе изготовления кругов целенаправленно ориентировали электростатическим полем в определённом направлении (см. главу 3).

Для количественного описания направления ориентации зёрен использовался угол наклона их наибольшей оси (Θ) по отношению к плоскости резания. В частности, изготавливались и испытывались отрезные круги с радиальной ориентацией зёрен, т.е. их пространственным расположением вдоль радиусов, в направлении от центра к периферии круга (Θ=90°). Также исследовались отрезные круги с тангенциальной ориентацией зёрен (Θ=0°), при которой наибольшие оси зёрен располагались параллельно плоскости резания. Кроме того, в качестве сравнительного эталона испытывались обычные отрезные круги без ориентации шлифовальных зёрен (Θ=var), изготовленные из той же абразивной смеси, на том же оборудовании и за один технологический цикл [69, 132, 143]. Для изготовления опытных кругов всех разновидностей использовались зёрна нормального электрокорунда 13AF46, которые специально не подвергались сортировке по форме с целью обеспечения наблюдения за изменением эксплуатационных показателей тестируемых кругов только от влияния одного фактора – ориентации зёрен, без смешивания его со вторым фактором – формой зёрен, что затрудняло бы последующий анализ и понимания сути получаемых результатов. Тем не менее, форма зёрен, из которых изготавливались круги, контролировалась. Методом количественной оценки формы зёрен в трёхмерном про-

странстве установлено, что средний коэффициент формы зёрен во фракции составил $K_ф \approx 2{,}4$.

Методика испытаний опытных шлифовальных кругов, а также использованное оборудование аналогичны тому, что и при испытании кругов с контролируемой формой зёрен (глава 5). Для проведения сравнительных испытаний приняты две схемы резания. Круги без УЭ испытывались при рабочей скорости 50 м/с по схеме с постоянным усилием прижатия заготовок к инструменту. Круги с УЭ испытывались при рабочей скорости 80 м/с как по схеме с постоянным усилием прижатия заготовок, так и с постоянной подачей инструментов (круглое врезное шлифование). В качестве заготовок при испытаниях всех разновидностей опытных кругов, согласно ГОСТ 21963-2002, использовались трубы 21,3×2,8 из стали 10. Кроме того, при испытаниях кругов с УЭ дополнительно использовались трубы 20×2 из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и трубы 20×2 из стали ШХ15, закалённые в масле на твёрдость 60 HRC. При проведении исследований оценивались: режущая способность (Q_m) и коэффициент шлифования ($K_ш$) опытных кругов, эффективная мощность резания ими ($W_{эф}$), а также качество отрезки заготовок, оцениваемое по теплонапряжённости процесса шлифования, по изменению микротвёрдости и микроструктуры металла вблизи плоскости отрезки и по шероховатости обработанных поверхностей.

6.1 Определение рациональных режимов резания и режущей способности шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен

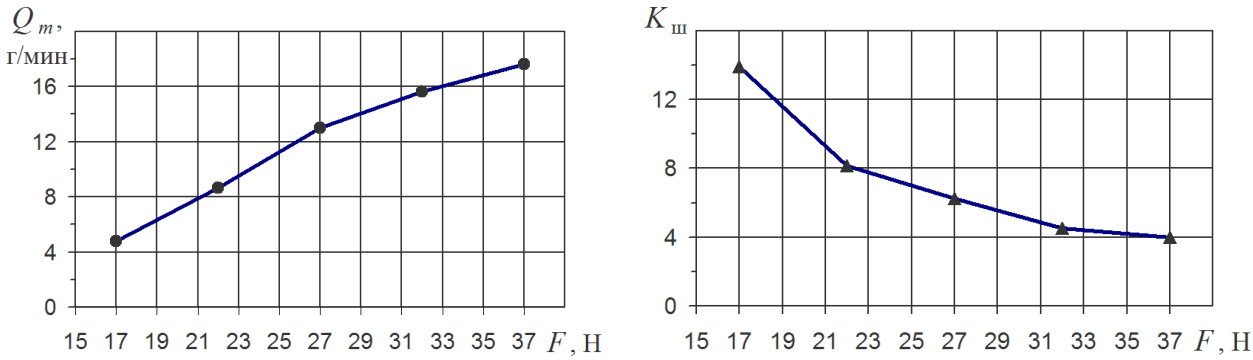
Режимы резания для испытаний кругов с ориентированными зёрнами по схеме круглого врезного шлифования были выбраны по результатам испытаний обычных кругов на различных подачах и частотах вращения заготовок [148]. Рациональная частота вращения шпинделя станка с заготовкой составляла 31,5 об/мин, а поперечная подача кругов – 0,084 мм/об.

Рациональные усилия прижатия заготовок к инструментам для испытаний опытных кругов по схеме с постоянной P_y определялись на кругах с неори-

ентированными зёрнами (Θ=var). Усилие прижатия заготовок к кругам без УЭ дискретно изменяли в пределах 17÷37 Н, а к кругам с УЭ – в пределах 22÷42 Н. Нагрузку изменяли при помощи грузов, каждый массой 0,5 кг, которые последовательно устанавливались на рычаг балансира нагрузочного устройства. Испытания проводились с рабочими скоростями 50 м/с и 80 м/с соответственно.

В качестве заготовок в обоих случаях использовались трубы 21,3×2,8 из стали 10. В процессе поиска ставилась задача установить такое усилие прижатия заготовок к испытуемым кругам, при котором процесс резания протекает достаточно эффективно и равномерно, обеспечивается стабильность получаемых результатов [п. 5.1.1, п. 5.2.1].

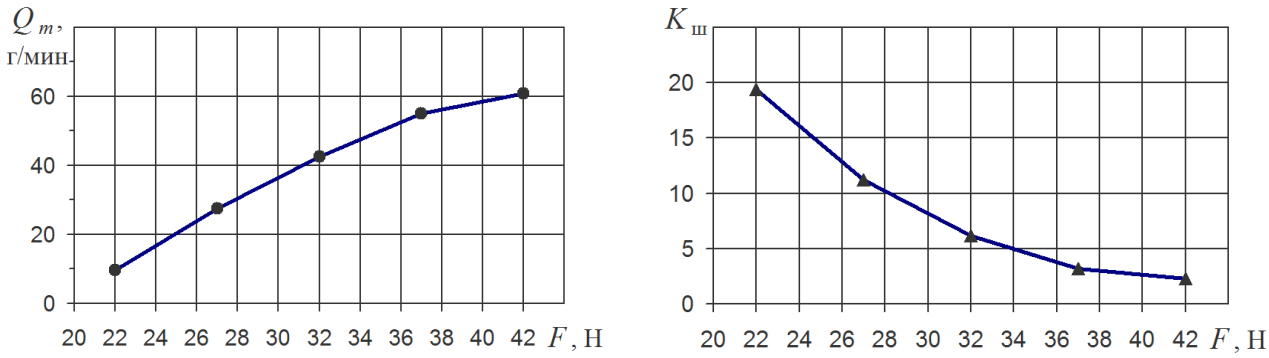
Результаты испытаний кругов без УЭ (Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ=var] S В 50 м/с) отражены в виде зависимостей режущей способности (рисунок 6.1, *а*) и коэффициента шлифования (рисунок 6.1, *б*) этих инструментов от усилия прижатия заготовок. Анализ полученных данных позволил установить, что в данном случае (т.е. для отрезных кругов без УЭ, работающих при скорости *V*=50 м/с) рациональным следует считать усилием прижатия заготовок *F* =27 Н.



а) *б)*

Рисунок 6.1 – Зависимость режущей способности (*а*) и коэффициента шлифования (*б*) от усилия прижатия заготовок у кругов без УЭ

Результаты испытаний опытных шлифовальных кругов с УЭ (Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ=var] S BF 80 м/с) представлены в виде зависимостей режущей способности и коэффициента шлифования от усилия прижатия заготовки к кругу на рисунке 6.2, *а*, *б*.



а) *б)*

Рисунок 6.2 – Зависимость режущей способности (*а*) и коэффициента шлифования (*б*) от усилия прижатия заготовок у кругов с УЭ

Анализ полученных результатов (рисунок 6.2, *а*, *б*) позволил сделать вывод, что при эксплуатации отрезных кругов с УЭ, работающих при скорости V=80 м/с, рациональное усилие прижатия заготовок к инструментам, удовлетворяющее требованиям эффективности процесса резания и равномерности износа отрезных кругов, составляет F=32 Н.

Экспериментальные данные по режущей способности отрезных шлифовальных кругов с контролируемой ориентацией зёрен, полученные на выбранных схемах резания, режимах и заготовках, представлены в виде диаграмм на рисунках 6.3 и 6.4, *а*, *б*.

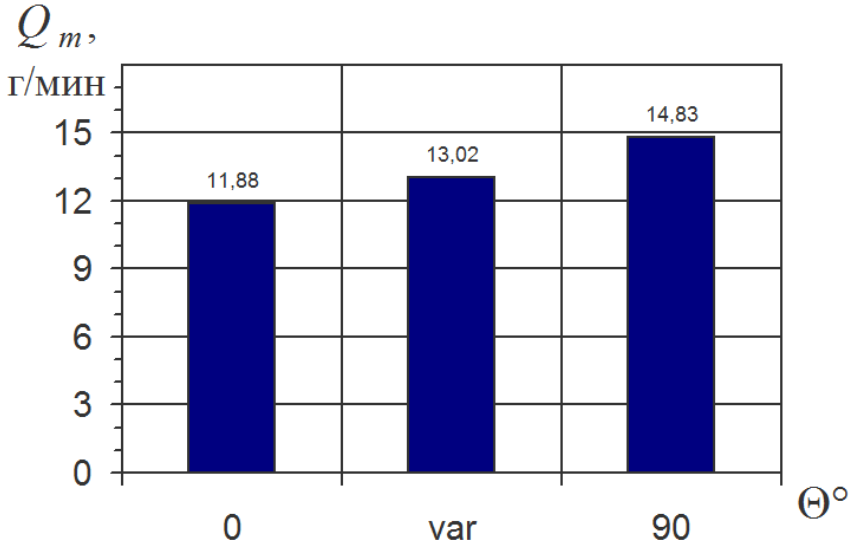
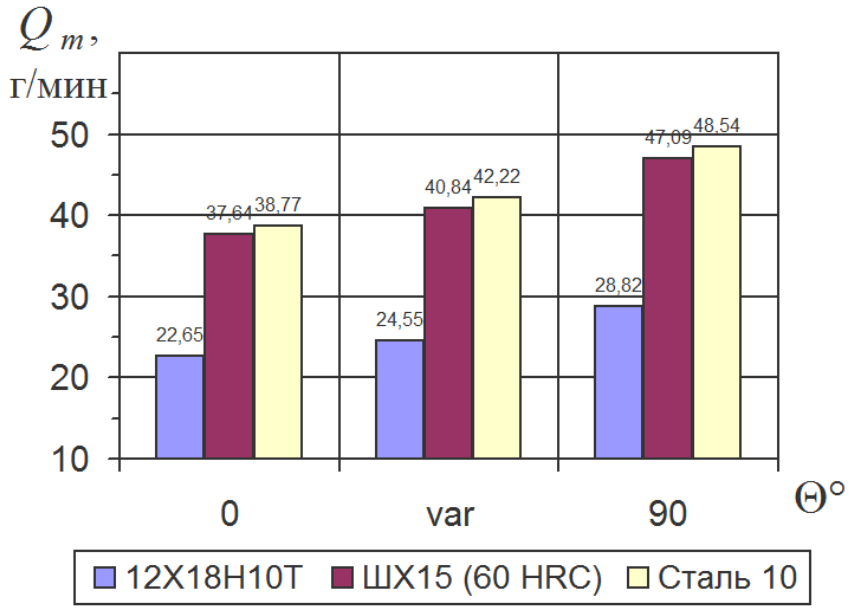
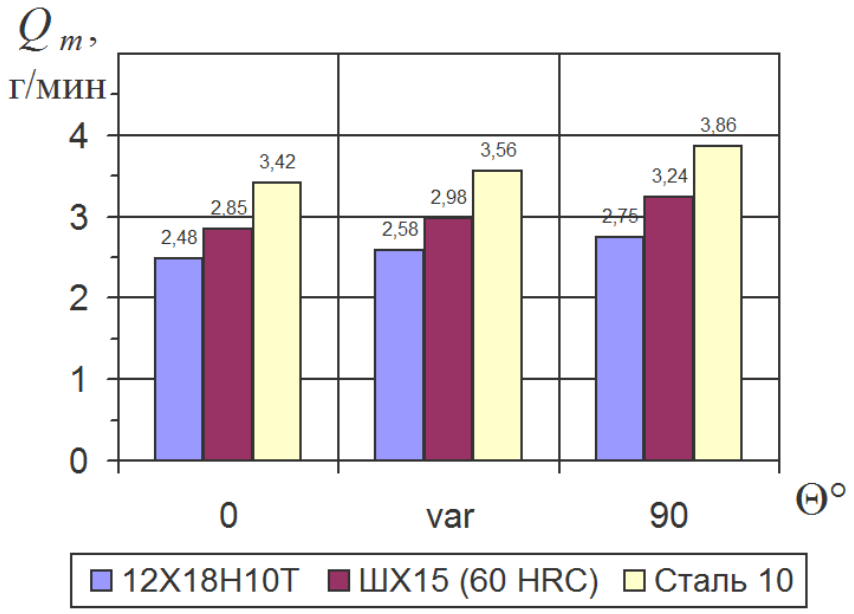


Рисунок 6.3 – Зависимость режущей способности (Q_m) отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с от угла ориентации шлифовальных зёрен (Θ) при обработке с постоянным усилием прижатия заготовок



а)



б)

Рисунок 6.4 – Зависимость режущей способности (Q_m) отрезных кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с от угла ориентации зёрен (Θ) при обработке с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

Изучение этих данных показывает, что при реализации предложенного способа изготовления шлифовальных инструментов достигается не только визуально фиксируемое при укладке абразивной смеси в прессформу ориентирование шлифовальных зёрен (п. 3.3.3, рис. 3.10), но также и ощутимая разница эксплуатационных показателей готовых отрезных кругов. Так, при переходе от

тангенциального направления ориентации шлифовальных зёрен (Θ=0°) к радиальной ориентации зёрен (Θ=90°), режущая способность отрезных кругов возрастает в 1,1÷1,27 раза, в зависимости от наличия УЭ, схемы и режимов резания, а также обрабатываемого материала. Так, режущая способность отрезных кругов без УЭ с тангенциально ориентированными зёрнами на 8,8 % ниже, чем у обычных кругов с неориентированными зёрнами. У кругов без УЭ с радиальной ориентацией зёрен, напротив, режущая способность на 13,9 % выше, чем у стандартных инструментов.

Режущая способность отрезных кругов с УЭ и тангенциально ориентированными зёрнами на 3,9÷8,2 % ниже, чем у обычных кругов с неориентированными зёрнами, а у отрезных кругов с УЭ и радиальной ориентацией зёрен режущая способность на 6,6÷17,4% выше, чем у стандартных инструментов (в зависимости от схемы шлифования и обрабатываемого материала).

Причиной роста режущей способности шлифовальных кругов при переходе от тангенциальной ориентации зёрен (Θ=0°) к радиальному их расположению в теле инструментов (Θ=90°) является различие величин углов резания при различных направлениях ориентации зёрен. Так, радиально расположенные зёрна имеют более острые передние углы, по сравнению с произвольно ориентированными и тангенциально ориентированными зёрнами (глава 2). Соответственно, такие зёрна при одинаковых режимах резания вызывают меньшие деформации обрабатываемого материала и интенсивнее участвуют в процессе резания по сравнению с неориентированными или тангенциально ориентированными зёрнами. Другой причиной более высокой режущей способности у кругов с радиальной ориентацией зёрен является несколько большее количество режущих кромок, находящихся на рабочей поверхности инструмента, по сравнению с кругами, в которых зёрна расположены тангенциально.

Полученные результаты также свидетельствуют, что схема шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок в 9÷15 раз более производительна, чем схема с постоянной подачей кругов.

Анализ литературных данных, кроме того, показывает, что полученные

результаты коррелируют с исследованиями по обрабатываемости материалов шлифованием [164, 187, 258]. Так, в работах Маслова Е.Н. [185, 186, 187] отмечается, что наиболее трудно (среди сравниваемых) обрабатываются стали со структурой аустенита (сталь 12Х18Н10Т), затем мартенсита (закалённая сталь ШХ15) и перлита (сталь 10). В исследованиях Корчака С.Н. [164, 165] и Филимонова Л.Н. [258, 259] конструкционные стали (например, – сталь 10) и низколегированные инструментальные стали перлитного класса (такие, как сталь ШХ15 или Х) выделяются в одну группу по обрабатываемости шлифованием.

Следует отметить, что полученные данные не позволяют построить одну математическую модель для всех материалов, например, двухфакторную зависимость режущей способности кругов от переднего угла зёрен и твёрдости обрабатываемого материала. Объясняется это тем, что на режущую способность шлифовальных инструментов оказывает влияние не только твёрдость обрабатываемых материалов, но также наличие в них легирующих элементов и тип кристаллической структуры. Кроме того, в процессе резания обрабатываемый материал нагревается (причём по-разному, в зависимости от марки стали), в результате чего изменяется его вязкость, что также влияет на режущую способность шлифовальных инструментов. Так, например, из диаграммы (рисунок 6.4, *а*) видно, что при обработке стали 10 и закалённой стали ШХ15, твёрдости которых различаются существенно, режущие способности кругов находятся практически на одном уровне. В то же время, при обработке стали 12Х18Н10Т, по сравнению со сталью 10 (твёрдости этих материалов различаются незначительно), режущие способности отрезных кругов с одинаковым направлением ориентации зёрен отличаются практически в два раза.

6.2 Коэффициент шлифования, эффективная мощность резания, составляющие силы резания P_y и P_z и их соотношение у шлифовальных кругов с заданной ориентацией зёрен

При оценке коэффициента шлифования отрезных шлифовальных кругов

Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с (230×3×32 13A40H [Θ] Т2 Б 50 м/с) без упрочняющих элементов и кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с (230×4×32 13A40H [Θ] Т2 БУ 80 м/с) с упрочняющими элементами применялись схемы, режимы резания и заготовки, аналогичные тем, что использовались при оценке режущей способности этих инструментов (п. 6.1)

Опытные данные о коэффициентах шлифования отрезных кругов с разной ориентацией зёрен без УЭ и с УЭ представлены на рисунках 6.5 и 6.6, *а, б*.

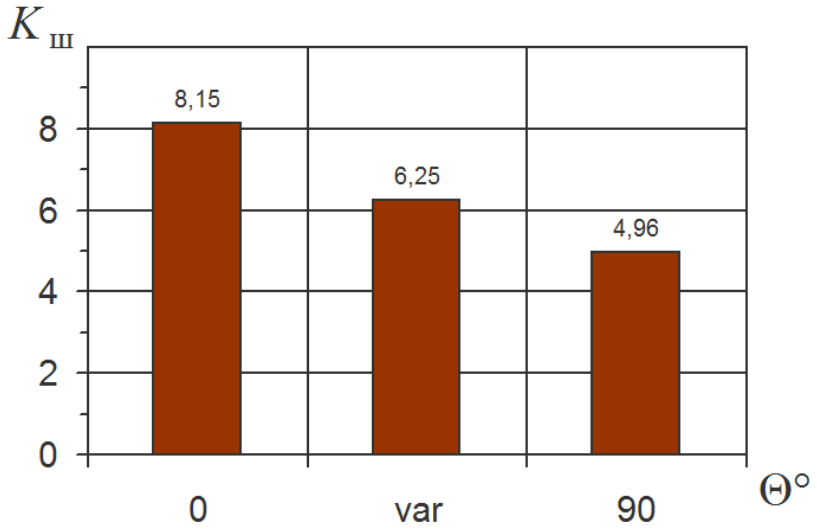
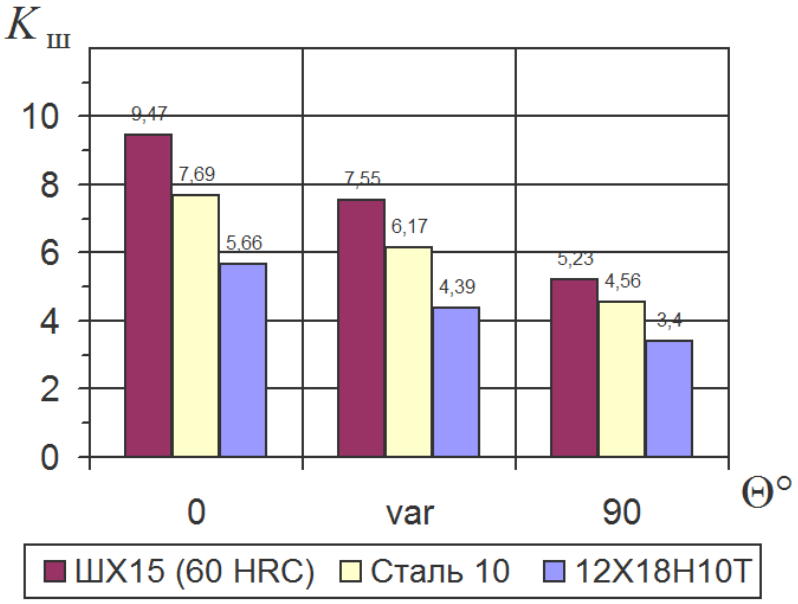
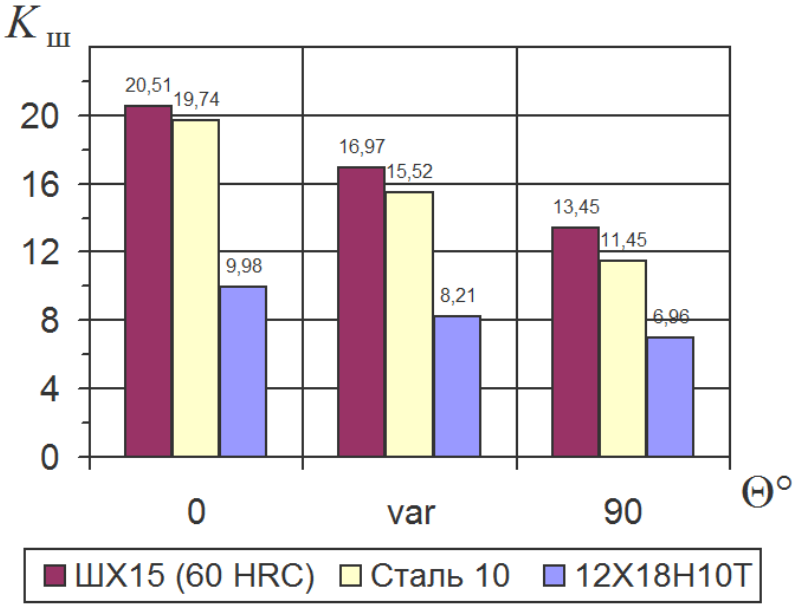


Рисунок 6.5 – Зависимость коэффициента шлифования ($K_ш$) у отрезных кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с от угла ориентации шлифовальных зёрен (Θ) при обработке с постоянным усилием прижатия заготовок

Анализ полученных результатов (рисунки 6.5 и 6.6, *а, б*.) говорит о том, что ориентация шлифовальных зёрен существенно влияет на износ шлифовальных кругов. Так, для кругов без УЭ переход от тангенциального направления ориентации шлифовальных зёрен (Θ=0°) к радиальной ориентации зёрен (Θ=90°), сопровождается снижением коэффициента шлифования отрезных кругов в 1,64 раза. Коэффициент шлифования отрезных кругов без УЭ с тангенциально ориентированными зёрнами на 30,4 % выше, чем у обычных кругов из неориентированных зёрен (Θ=var). У отрезных кругов без УЭ с радиальной ориентацией зёрен, напротив, коэффициент шлифования на 20,6 % ниже, чем у стандартных инструментов.



а)



б)

Рисунок 6.6 – Зависимость коэффициента шлифования ($K_ш$) у отрезных кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с от угла ориентации шлифовальных зёрен (Θ) при обработке с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

Коэффициенты шлифования отрезных кругов с УЭ и тангенциально ориентированными зёрнами на 20,9÷28,9 % выше, чем у обычных кругов с неориентированными зёрнами. У кругов с УЭ и радиальной ориентацией зёрен, напротив, коэффициенты шлифования на 15,2÷30,7 % ниже, чем у стандартных

инструментов (в зависимости от схемы шлифования и обрабатываемого материала).

Причиной снижения коэффициентов шлифования отрезных кругов при переходе от тангенциального (Θ=0°) к радиальному направлению ориентации шлифовальных зёрен (Θ=90°) является повышение уровня напряжений в зёрнах и, как следствие, интенсификация износа последних (глава 2).

Следует также отметить, что по результатам испытаний во всех случаях выявлено более значительное влияние ориентации шлифовальных зёрен на коэффициент шлифования отрезных кругов, чем на их режущую способность.

Кроме того, полученные результаты (без учета эффекта ориентации), в целом коррелируют с исследованиями Маслова Е.Н. [186, 187], в которых при шлифовании кругами на бакелитовой связке марок сталей, близких по комплексу физико-механических свойств к использованным в данной работе, получено аналогичное по характеру распределение коэффициентов шлифования.

Для оценки эффективной мощности резания экспериментальных кругов с контролируемой ориентацией зёрен, как и при оценке других показателей, применялись аналогичные схемы и режимы резания, а также заготовки (п. 6.1). Результаты испытаний представлены в виде диаграмм на рисунках 6.7 и 6.8, *а*, *б*.

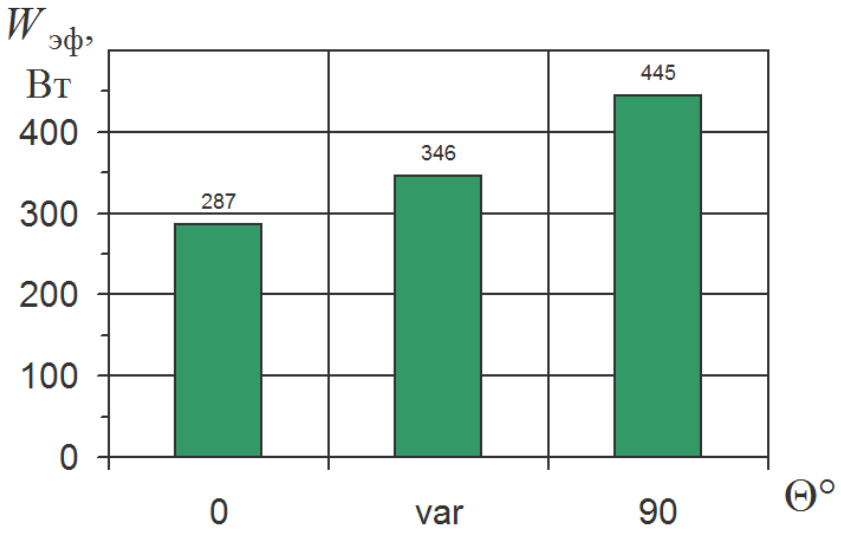
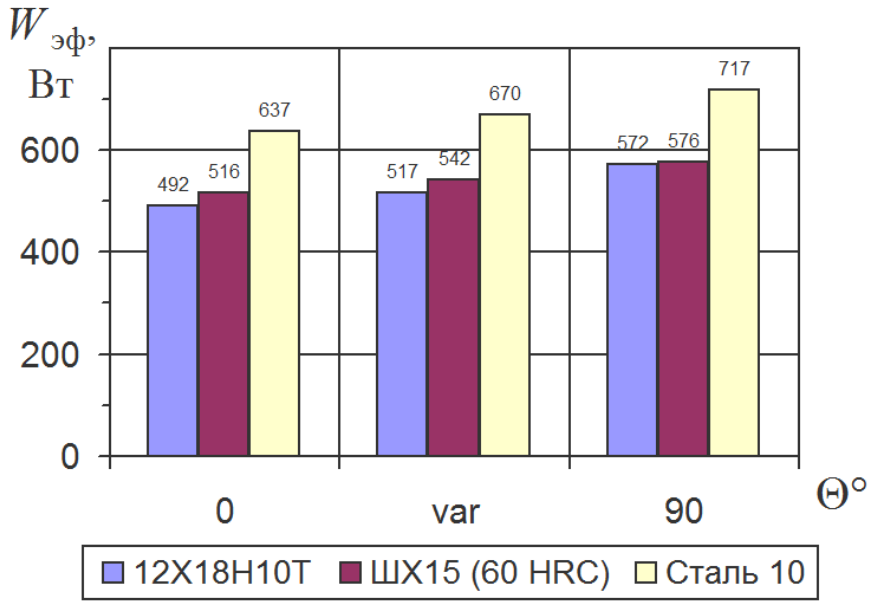
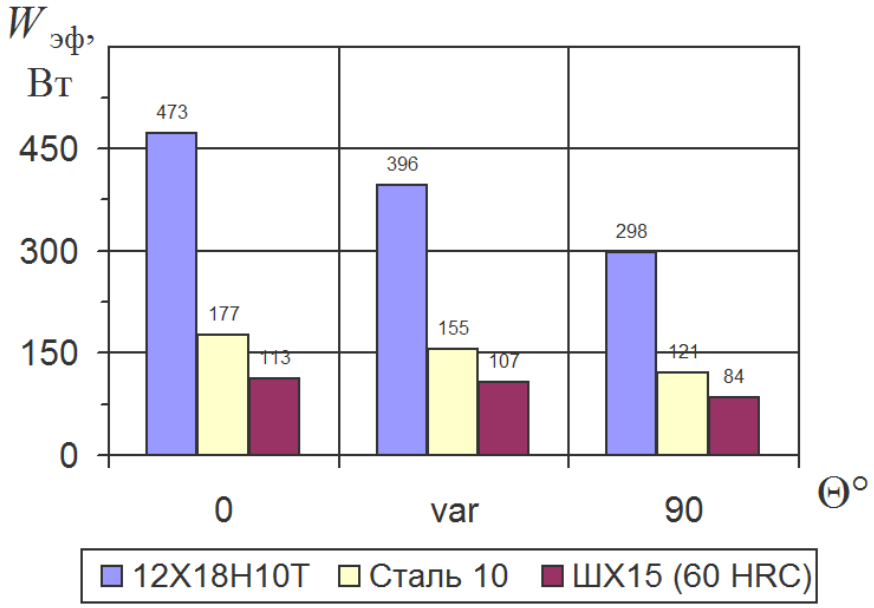


Рисунок 6.7 – Зависимость эффективной мощности резания ($W_{эф}$) у кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с от угла ориентации шлифовальных зёрен (Θ) при обработке с постоянным усилием прижатия заготовок



а)



б)

Рисунок 6.8 – Зависимость эффективной мощности резания ($W_{эф}$) у отрезных кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с от угла ориентации шлифовальных зёрен (Θ) при обработке с P_y=const (*а*) и $S_{круга}$=const (*б*)

Результаты показывают, что при схеме шлифования с P_y=const при переходе от использования в шлифовальных кругах тангенциально ориентированных абразивных зёрен (Θ=0°) к радиальному их расположению (Θ=90°), эффективная мощность резания возрастает в 1,12÷1,16 раза при обработке заготовок из различных сталей на скорости 80 м/с и в 1,55 раза при обработке заготовок из

стали 10 на скорости 50 м/с. Эффективная мощность резания при работе отрезных кругов с тангенциально ориентированными зёрнами (Θ=0°) на 4,8÷17,1% ниже, чем у инструментов из неориентированных зёрен (Θ=var). Для кругов с радиальной ориентацией зёрен (Θ=90°) эффективная мощность при их работе на 6,3÷28,6% выше, чем у стандартных инструментов. При этом, чем меньше скорость шлифования, тем больше разница абсолютных значений тангенциальной составляющей силы резания P_z, что в отчасти может объясняться различной жесткостью приводного электродвигателя постоянного тока испытательного стенда на различных скоростях шлифования. Полученная же качественная картина объясняется тем, что увеличение передних углов зёрен, в данном случае, – за счёт их ориентации в инструменте, также как и посредством целенаправленного регулирования формы зёрен (п. 5.2.2, п. 5.3.2), приводит к снижению деформаций обрабатываемого материала. При схеме шлифования с P_y=const это выражается в увеличении толщины срезаемых стружек, ощутимом росте режущей способности шлифовальных кругов. что соответствующим образом отражается на увеличении эффективной мощности резания и составляющей силы резания P_z.

При схеме шлифования с постоянной подачей кругов, когда обе составляющие силы резания изменяются, переход от тангенциального ориентирования зёрен в кругах (Θ=0°) к радиальному их расположению (Θ=90°) сопровождается снижением эффективной мощности резания в 1,35÷1,59 раза в зависимости от обрабатываемого материала. Эффективная мощность резания при работе кругов с тангенциально ориентированными зёрнами на 5,6÷19,4% выше, чем у обычных инструментов из неориентированных зёрен (Θ=var). У кругов с радиальной ориентацией зёрен она на 21,5÷24,8 % ниже, чем у стандартных инструментов.

Выявленный качественный характер зависимостей здесь находит объяснение в том, что при круглом врезном шлифовании толщины срезаемых стружек заданы частотой вращения заготовки и величиной подачи инструмента. Соответственно увеличение передних углов зёрен за счёт их ориентации приводит к

уменьшению деформаций обрабатываемого материала и к снижению составляющих силы резания. Полученные результаты имеют общую физическую основу с характером влияния геометрии режущих клиньев лезвийных инструментов на составляющие силы резания.

Сравнительный анализ эффективных мощностей резания при обработке различных материалов, показывает также, что существенное влияние на данный эксплуатационный показатель оказывают химический состав, тип кристаллической структуры и площадь контакта шлифовальных кругов с заготовками. Заметно выделяются, по сравнению с другими обрабатываемыми материалами, эффективные мощности резания у шлифовальных кругов при отрезке заготовок из стали 10 (рисунок 6.8, *а*). Большие значения эффективных мощностей резания здесь связаны с высокой режущей способностью кругов при обработке этих заготовок (п. 6.1), а также большей площадью контакта шлифовальных кругов с заготовками.

Сравнение эффективных мощностей резания при обработке заготовок из сталей различных марок также показывает, что при схеме круглого врезного шлифования, когда площадь контакта кругов с заготовками постоянна, получена качественная картина, характерная для многих операций шлифования. Так, наибольшие эффективные мощности, кратно превосходящие другие случаи обработки, зафиксированы при шлифовании заготовок из стали 12Х18Н10Т со структурой аустенита. Далее, по убыванию следует случай обработки заготовок из стали 10 со структурой перлита. Наименьшие эффективные мощности зафиксированы при шлифовании заготовок из стали ШХ15 (60 HRC) со структурой мартенсита.

Кроме того, следует отметить, что, независимо от схемы и режимов шлифования, а также от обрабатываемого материала, увеличение передних углов зёрен посредством их целенаправленной ориентации и подбора формы (п. 5.2.3, п. 5.3.3) позволяет повысить режущую способность инструментов, снизить время обработки и общие энергозатраты. Последнее связано с тем, что более половины общих энергозатрат при шлифовании составляют мощности, затра-

чиваемые на холостой ход кругов и на вращение заготовок, вследствие чего мощности рабочих ходов инструментов изменяются не столь существенно по сравнению с изменениями их режущей способности.

Анализ результатов оценки величин составляющей силы резания P_z при испытаниях опытных кругов по схеме шлифования с постоянным усилием прижатия между инструментом и заготовкой (P_y=const) показывает, что увеличение передних углов зёрен в инструменте за счёт их ориентации приводит к снижению деформаций обрабатываемого материала, увеличению толщины срезаемых стружек и, как результат, к существенному росту P_z (рисунок 6.9, рисунок 6.10). При переходе от тангенциальной ориентации абразивных зёрен в шлифовальных кругах (Θ=0°) к радиальному их расположению (Θ=90°), составляющая силы резания P_z возрастает в 1,12÷1,16 раза при обработке заготовок из различных сталей на скорости 80 м/с и в 1,55 раза при обработке заготовок из стали 10 на скорости 50 м/с. Величины P_z здесь получены делением значений эффективной мощности резания на скорости шлифования. При этом, соотношение составляющих силы резания P_y/P_z пропорционально уменьшается при переходе от кругов с тангенциальной ориентацией зерен к инструментам с их радиальным расположением (рисунок 6.11, рисунок 6.12) [68].

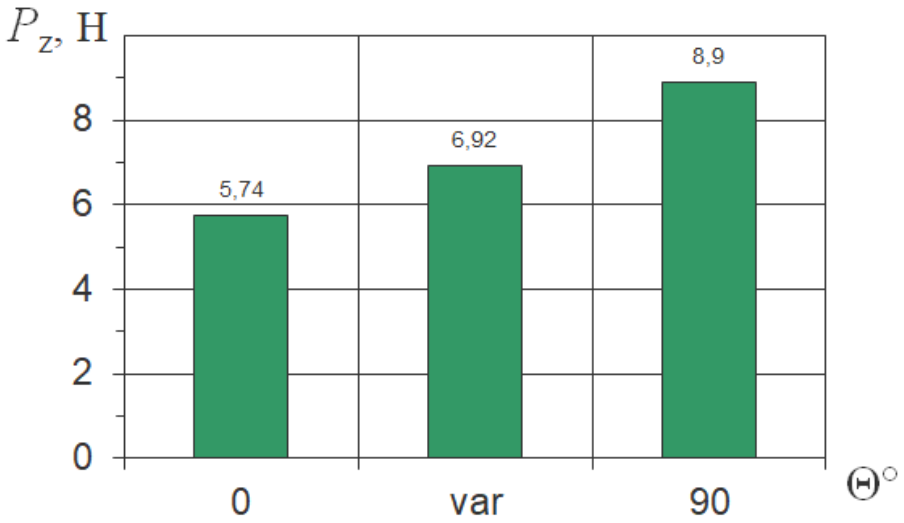


Рисунок 6.9 – Зависимость составляющей силы резания (P_z) от угла ориентации шлифовальных зёрен (Θ) у кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] С В 50 м/с при обработке с P_y=27 Н

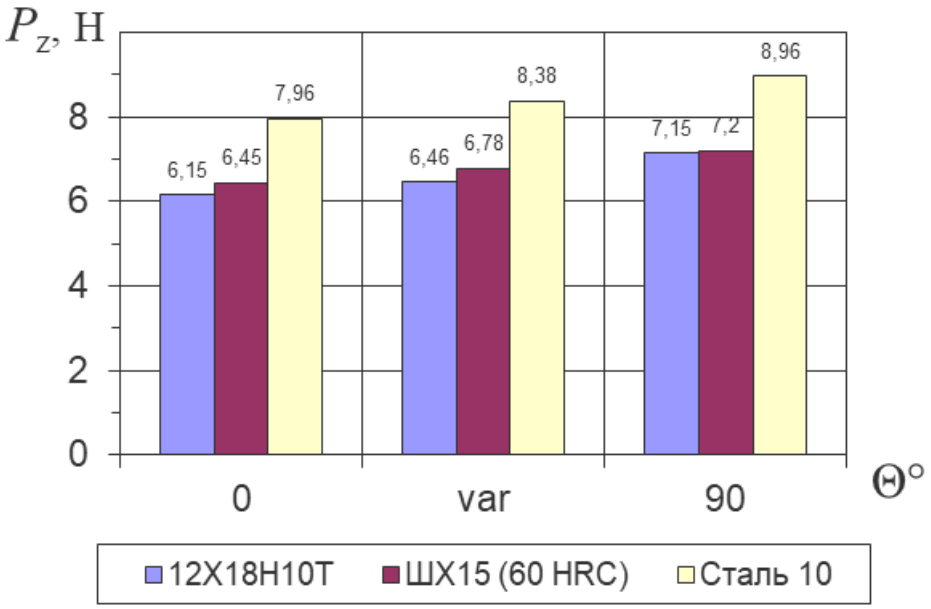


Рисунок 6.10 – Зависимость составляющей силы резания (P_z) от угла ориентации зёрен (Θ) у кругов Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с при обработке с P_y=32 Н

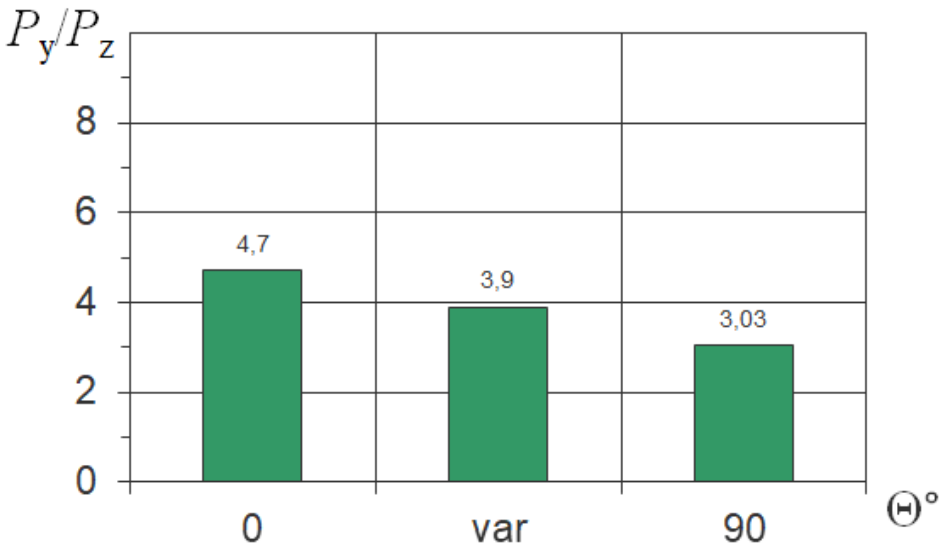


Рисунок 6.11 – Зависимость соотношений составляющих силы резания (P_y/P_z) от угла ориентации зёрен (Θ) у кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S B 50 м/с при обработке с P_y=27 Н

Результаты показывают, что уменьшение соотношений P_y/P_z при переходе от кругов с тангенциальной ориентацией зерен к инструментам с их радиальным расположением происходит с 4,7 до 3 раз при работе инструментами

без упрочняющих стеклосеток на скорости 50 м/с и с 4÷5,2 до 3,6÷4,5 раз при работе инструментами, армированными стеклосетками, при скорости 80 м/с.

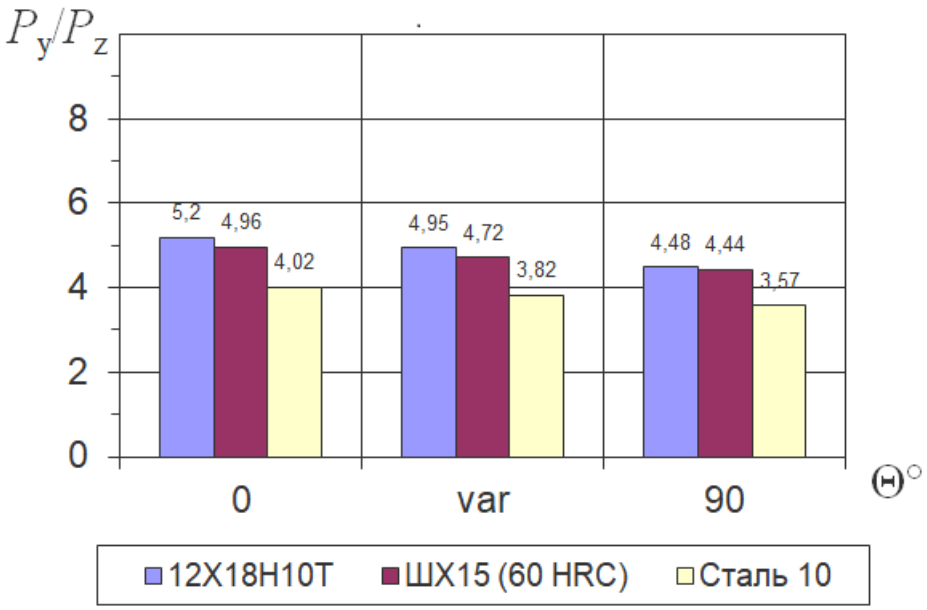
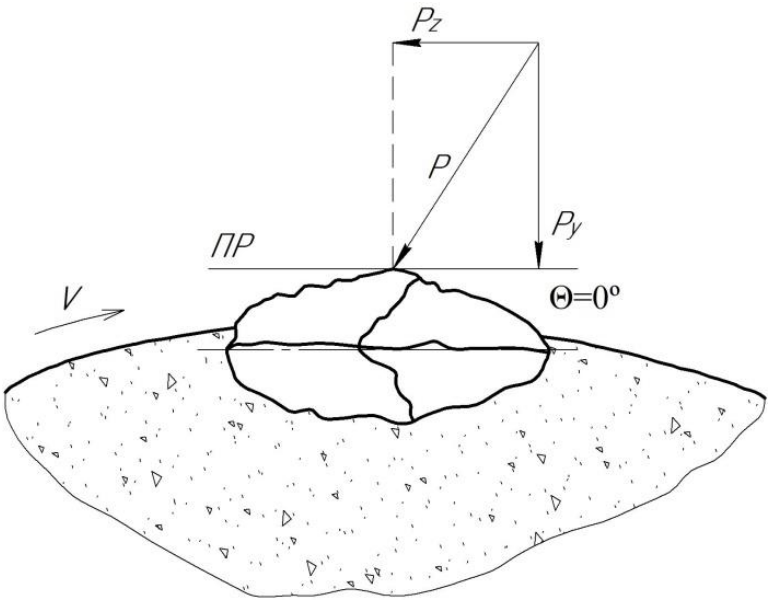


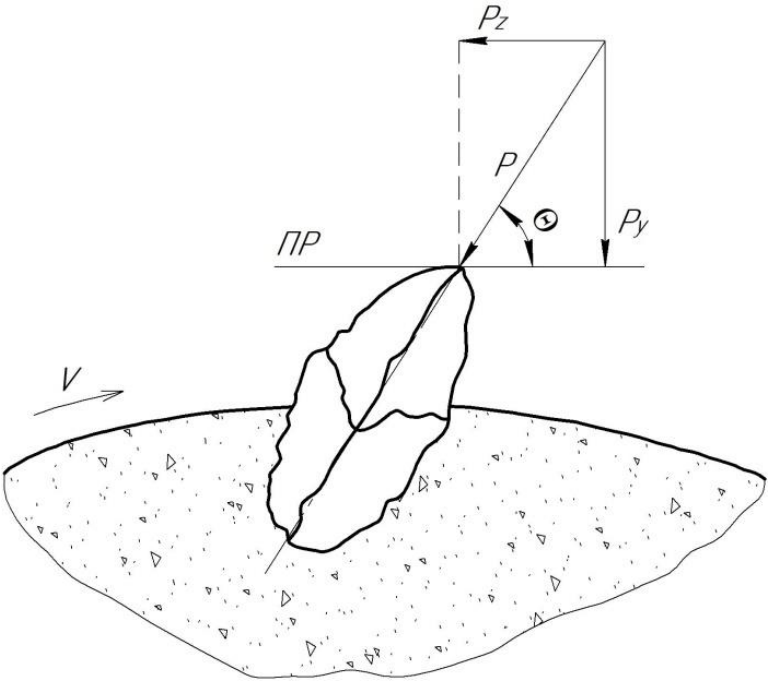
Рисунок 6.12 – Зависимость соотношений составляющих силы резания (P_y/P_z) от угла ориентации зёрен (Θ) у кругов Тип 41 230×3×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с при обработке с P_y=32 Н

Исследования показывают, что радиальное ориентирование зёрен в инструменте (Θ=90°) с целью повышения передних углов режущих микроклиньев, снижения за счет этого деформаций и температур обрабатываемого материала, а также повышения производительности обработки при шлифовании не является оптимальным вариантом ориентации зёрен. Более значительных результатов можно достичь ориентируя зёрна наклонно, вершинами навстречу составляющей силы резания P_z.

Подробное 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 (Θ=0°) и ориентация зёрен наибольшими осями по направлению действия силы резания P (рисунок 6.13).



а)



б)

Рисунок 6.13. – Тангенциальная ориентация зёрен в шлифовальных кругах относительно плоскости резания (а) и ориентация зёрен наибольшими осями по направлению действия силы резания (б)

При тангенциальной ориентации зёрен, независимо от направления действия силы резания *P*, зерно воспринимает преимущественно сжимающие

нагрузки и обладает наибольшей прочностью. Следующий по убыванию прочности рациональный вариант ориентирования зёрен, – это их расположение главными осями по направлению действия сжимающей нагрузки (для шлифования, – по направлению действия силы резания P), что подтверждается прочностными испытаниями зёрен методом одноосного поштучного сжатия при различных вариантах ориентации [143]. Чем больше рассогласование между направлением действия вектора сжимающей нагрузки и главной осью зерен, тем меньшее усилие требуется для их разрушения.

При этом, во всех случаях ориентирования, чем более вытянутую игольчато-пластинчатую форму имеют зёрна (чем больше коэффициент их формы $K_ф$), тем меньше их прочность [121].

Физическая основа этих закономерностей состоит в том, что абразивные материалы, – электрокорунды на основе оксида алюминия, карбиды кремния и др. характеризуются тем, что их пределы прочности на сжатие в десять раз и более превосходят их же пределы прочности на изгиб. Соответственно, абразивные зёрна из этих материалов хорошо работают на сжатие, например при тангенциальном варианте их ориентации и разрушаются при существенно меньших усилиях в случаях, когда неоптимальная ориентация зёрен приводит к росту в них изгибающих нагрузок.

Таким образом, исследования по оценке соотношений составляющих силы резания позволяют определить рациональные углы ориентирования зёрен в шлифовальных инструментах для различных операций шлифования и обработки различных материалов. В рассматриваемом случае расчет рациональных углов ориентации зёрен (через арктангенс соотношений P_y/P_z) позволил установить следующее. При обработке заготовок из стали 10 на скорости шлифования 50 м/с рациональный угол ориентации зёрен находится в диапазоне $\Theta=72°\div78°$ и в среднем составляет $\Theta=75°$, а при обработке заготовок из стали той же марки на скорости 80 м/с этот угол находится в диапазоне $\Theta=74°\div76°$ и в среднем также составляет $\Theta=75°$. При обработке заготовок из стали 12Х18Н10Т и стали

ШХ15 (60 HRC) рациональный угол ориентации зёрен находится в диапазоне Θ=77°÷79° и в среднем составляет Θ=78°.

Таким образом, ориентирование зёрен под установленными рациональными углами Θ в отрезных шлифовальных кругах, используемых для обработки указанных марок сталей по схеме с постоянным усилием прижатия между инструментом и заготовкой, позволяет дополнительно уменьшить деформации и температуры обрабатываемых материалов и повысить производительность обработки, а также несколько снизить износ инструментов по сравнению с вариантом радиальной ориентации зёрен в шлифовальных кругах.

6.3 Температура при резании, микротвёрдость и микроструктура заготовок, а также шероховатость обработанных поверхностей после шлифования кругами с заданной ориентацией шлифовальных зёрен

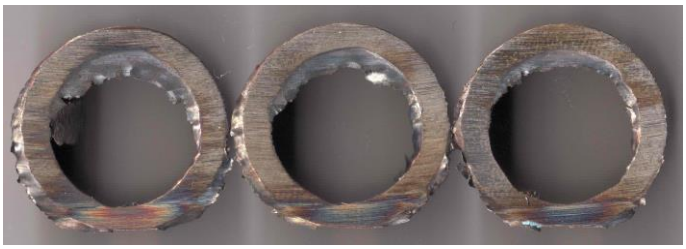
Данный раздел посвящён исследованию влияния ориентации шлифовальных зёрен на тепловые явления и структурные изменения в материале заготовок, а также на шероховатость поверхностей при обработке отрезными кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с (230×4×32 13А40Н [Θ] Т2 БУ 80 м/с) с контролируемой ориентацией зёрен и с УЭ. Круги с подобной характеристикой (с УЭ) в настоящее время являются наиболее распространенным типом отрезных инструментов. Для определения температур вблизи плоскости отрезки при работе экспериментальных шлифовальных кругов с контролируемой ориентацией зёрен был применён способ, основанный на анализе цветов побежалости на поверхности металла (п. 5.1.2). В процессе проведения испытаний использовались заготовки, аналогичные предшествующим исследованиям, т.е. трубы 21,3×2,8 из стали 10, трубы 20×2 из стали 12Х18Н10Т, а также трубы 20×2 из закаленной стали ШХ15 (60 HRC). Обеспечивалось единство режимов резания: усилие прижатия заготовки к кругу во всех случаях составляло 32 Н, а скорость резания – 80 м/с. Образцы труб после отрезки сканировали по торцовым поверхностям, а также в продольном направлении (рисунок 6.14, *А, Б, В*).



А *а)* *б)* *в)*



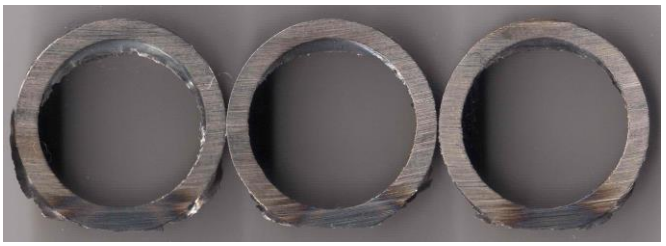
а) *б)* *в)*



Б *а)* *б)* *в)*



а) *б)* *в)*



В *а)* *б)* *в)*



а) *б)* *в)*

Рисунок 6.14 – Торцы труб и трубы в продольном направлении, разрезанные опытными кругами с контролируемой ориентацией зёрен: *а)* Θ=0°; *б)* Θ=var; *в)* Θ=90° из сталей 10 (*А*), 12Х18Н10Т (*Б*) и ШХ15 (60 HRC) (*В*)

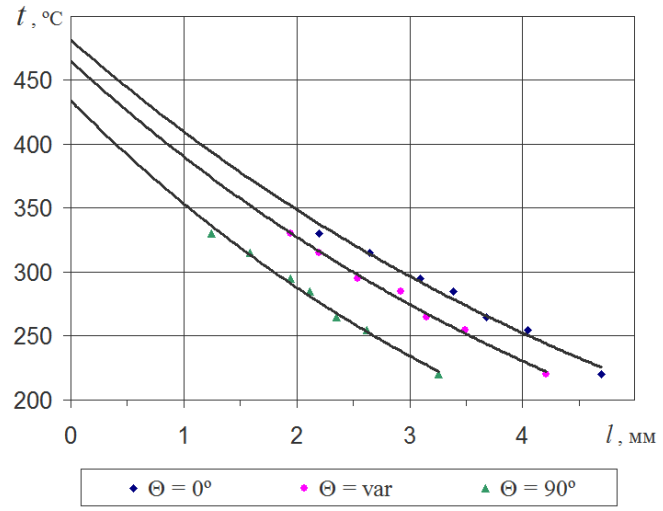
Изображения заготовок анализировали в графическом редакторе «Paint» и с помощью каталога цветов побежалости устанавливали характерные температурные зоны в зависимости от их удаления от плоскости отрезки.

Из полученных изображений заготовок, разрезанных кругами с контролируемой ориентацией шлифовальных зёрен (рисунок 6.9) видно, что независимо от марки стали, во всех случаях при переходе от тангенциальной ориентации зёрен (Θ=0°) к радиальному их расположению (Θ=90°) общая теплонапряжённость процесса резания и степень нагрева заготовок снижаются.

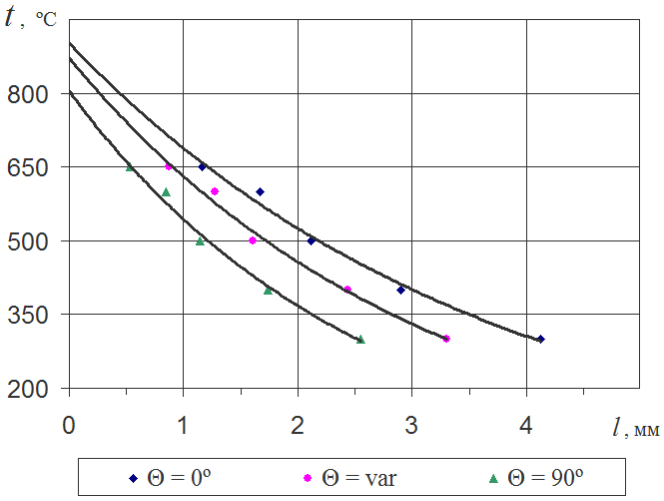
Изучение цветов побежалости вдоль осей труб, обработанных отрезными шлифовальными кругами с контролируемой ориентацией зёрен, позволили установить характерные температурные зоны на различном удалении от плоскости отрезки для заготовок из разных сталей. Полученные данные представлены на графиках (рисунок 6.15, *а, б, в*).

Из представленных данных (рисунок 6.15, *а*) следует, что наибольшая глубина прогрева металла, фиксируемая по цветам побежалости, при обработке заготовок из стали 10 характеризует работу кругов с тангенциальной ориентацией зёрен и составляет 4,7 мм от плоскости отрезки. Наименьший прогрев металла фиксируется при разрезке заготовок шлифовальными кругами с радиальной ориентацией зёрен. Здесь визуально фиксируемая зона термического влияния имеет максимальную глубину порядка 3,3 мм. При этом, разница значений абсолютных температур на заготовках, обработанных различными типами кругов, увеличивается по мере удаления от плоскости отрезки. Так, непосредственно у зоны резания она составляет 17÷47 °С, а на расстоянии 3 мм от плоскости отрезки варьируется в пределах 22÷63 °С.

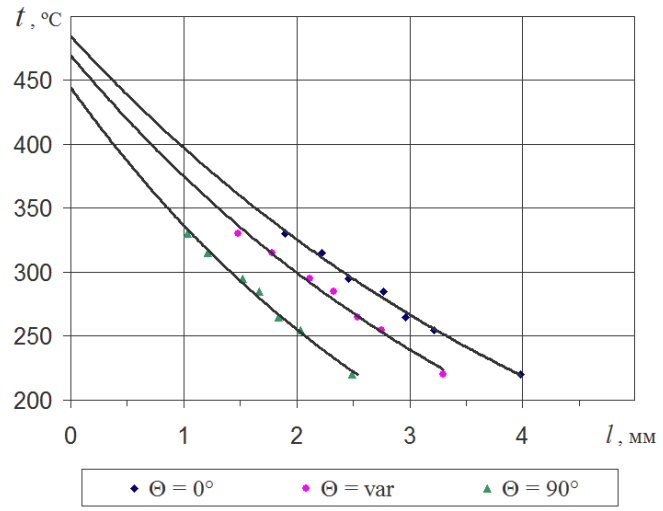
При изучении цветов побежалости на трубах из стали 12Х18Н10Т, разрезанных шлифовальными кругами с контролируемой ориентацией зёрен (рисунок 6.14, *б*), были выявлены аналогичные зависимости, как и при изучении заготовок из стали 10. А именно, при переходе от тангенциальной ориентации зёрен (Θ=0°) к радиальному их расположению (Θ=90°) в кругах общая теплонапряжённость процесса резания и степень нагрева заготовок снижаются.



а)



б)



в)

Рисунок 6.15 – Нагрев металла (*t*) на различном удалении от плоскости отрезки (*l*) при работе кругами с ориентированными зёрнами по стали 10 (*а*), стали 12Х18Н10Т (*б*), стали ШХ15 (60 HRC) (*в*)

При этом, разница температур у зоны резания при использовании шлифовальных кругов с различной ориентацией зёрен составляет 30÷97 °С, а на расстоянии 2,5 мм от плоскости отрезки варьируется в пределах 70÷165 °С.

Следует также отметить, что во всех случаях процесс отрезки заготовок из стали 12Х18Н10Т отличался наибольшей продолжительностью по времени, в 1,6÷1,7 превышающей аналогичные показатели при обработке заготовок из других использованных при испытаниях марок сталей. При обработке заготовок из стали 12Х18Н10Т (наиболее труднообрабатываемой среди представленных) визуально наблюдалась наибольшая теплонапряжённость процесса резания (до появления свечения металла). В то же время, характерные переходы цветов побежалости здесь были зафиксированы на меньшем расстоянии, чем, например, у заготовок из стали 10. Объясняется это химическим составом (большим процентом легирующих элементов) и структурой стали 12Х18Н10Т, которая относится к коррозионно-стойким сталям аустенитного класса. В связи с тем, что цвета побежалости являются особой формой тончайших поверхностных окислов, их появление на указанной стали происходит при значительно более высоких температурах, чем на сталях перлитного класса. Соответственно, для сталей аустенитного класса существует и применяется каталог цветов побежалости с более высокими температурами цветовых переходов.

Данные по обработке стали ШХ15 показывают, что наибольшая глубина прогрева металла, фиксируемая по цветам побежалости, как и в предыдущих случаях, наблюдается при работе отрезных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен и составляет 4 мм от плоскости отрезки. Наименьший прогрев металла наблюдается при разрезке заготовок шлифовальными кругами с радиальной ориентацией зёрен. Визуально фиксируемая зона термического влияния здесь имеет максимальную глубину порядка 2,5 мм. При этом, разница абсолютных температур на заготовках, обработанных различными типами кругов, увеличивается по мере удаления от плоскости отрезки: у зоны резания она составляет 15÷40 °С, а на расстоянии 2,5 мм от плоскости отрезки - 27÷73 °С.

Кривые, представленные на рисунке 6.10, *а*, *б*, *в*, отражающие температу-

ры при резке заготовок из разных сталей кругами с контролируемой ориентацией зёрен, выражаются следующими экспоненциальными зависимостями:

для стали 10:

$\Theta=0°$ $t = 481{,}61 \cdot e^{-0{,}161 \cdot l}$; $R^2=0{,}98$ (6.1)

$\Theta=var$ $t = 465{,}12 \cdot e^{-0{,}175 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.2)

$\Theta=90°$ $t = 434{,}33 \cdot e^{-0{,}206 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.3)

для стали 12Х18Н10Т:

$\Theta=0°$ $t = 901{,}89 \cdot e^{-0{,}270 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.4)

$\Theta=var$ $t = 871{,}76 \cdot e^{-0{,}323 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.5)

$\Theta=90°$ $t = 804{,}37 \cdot e^{-0{,}392 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.6)

для стали ШХ15 (60 HRC):

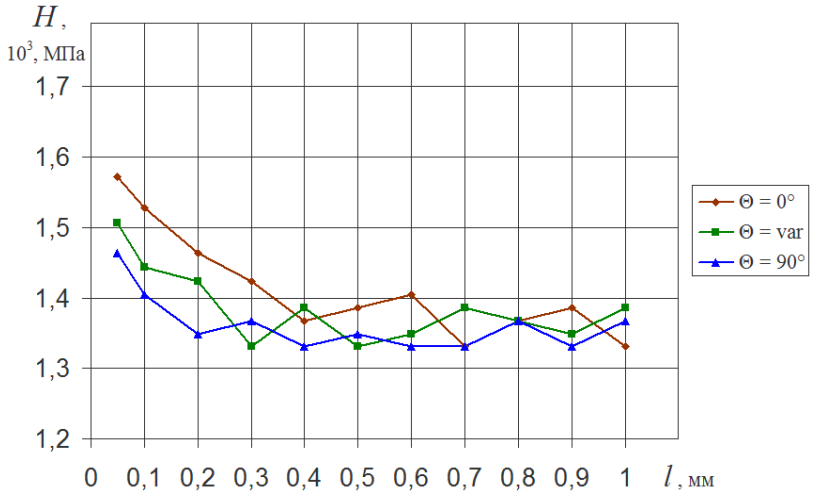
$\Theta=0°$ $t = 484{,}67 \cdot e^{-0{,}199 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.7)

$\Theta=var$ $t = 469{,}40 \cdot e^{-0{,}224 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.8)

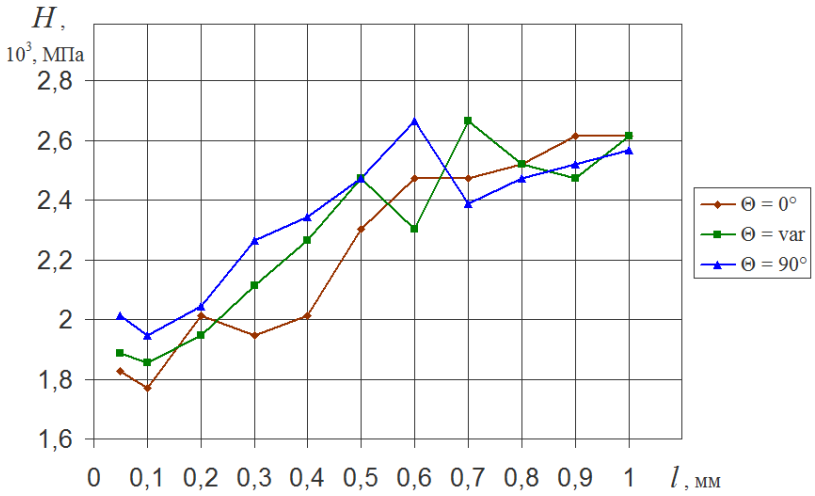
$\Theta=90°$ $t = 444{,}47 \cdot e^{-0{,}277 \cdot l}$; $R^2=0{,}99$ (6.9)

Анализ всех рассмотренных случаев отрезки заготовок из сталей различных марок показывает, что целенаправленное ориентирование шлифовальных зёрен в отрезных кругах позволяет регулировать теплонапряжённость процесса резания. Так, например, применение отрезных кругов с радиальной ориентацией зёрен ($\Theta=90°$), по сравнению с обычными отрезными кругами с неориентированными зёрнами ($\Theta=var$), позволяет снизить температуру в зоне резания на 20÷70 °С и тем самым сократить размер зон термического влияния. При этом, чем выше вязкость обрабатываемого материала заготовок, тем больше достигаемый эффект.

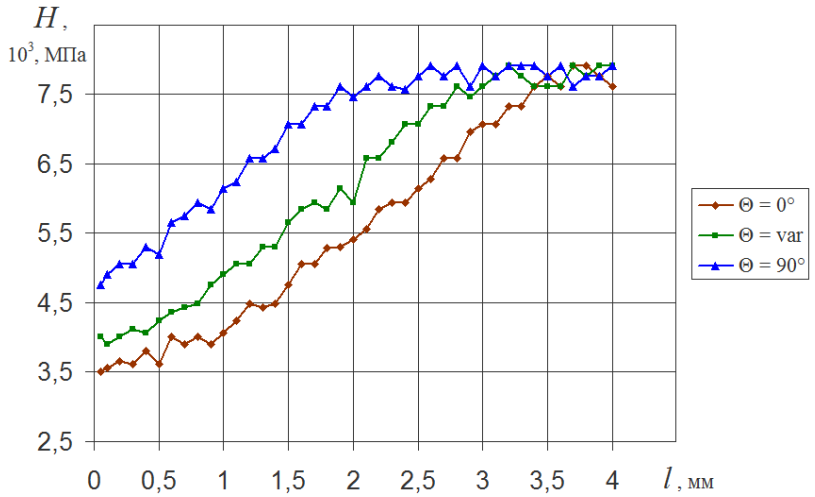
Для выяснения влияния разницы в нагреве заготовок при их отрезке кругами с контролируемой ориентацией зёрен на структуру и твёрдость обрабатываемого металла были проведены исследования микротвёрдости и микроструктуры материала заготовок вблизи зоны резания, для чего из рассматриваемых образцов труб (рисунок 6.14, *А*, *Б*, *В*) были изготовлены шлифы. Исследования микротвёрдости (рисунок 6.16, *а*, *б*, *в*) осуществлялись на приборе ПМТ-3.



а)



б)



в)

Рисунок 6.16 – Микротвёрдость (*H*) образцов из сталей 10 (*а*), 12Х18Н10Т (*б*), ШХ15 (60 HRC) (*в*) после отрезки кругами с ориентированными зёрнами, на различном удалении от зоны резания (*l*)

При изучении образцов из стали 10 и стали 12Х18Н10Т испытательная нагрузка составляла 1 Н. На каждом образце первые два измерения проводились на удалении 0,05 и 0,1 мм от края реза, а последующие – через 0,1 мм на максимальное удаление 1 мм. При изучении образцов из стали ШХ15 (60 HRC) испытательная нагрузка составляла 2 Н. Первые два измерения проводились на удалении 0,05 и 0,1 мм от края реза, а последующие – через 0,1 мм на максимальное удаление 4 мм.

Полученные данные (рисунок 6.16, *а*) свидетельствуют о том, что вблизи плоскости отрезки у всех образцов из стали 10 имеется поверхностное упрочнение (наклёп), обусловленное пластической деформацией металла, возникающей в процессе шлифования. При этом, величина и глубина зоны поверхностного упрочнения уменьшаются при переходе от использования шлифовальных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен к кругам с радиальным их расположением. Объясняется это геометрией ориентированных зёрен. Кроме того, обработка кругами с тангенциально расположенными зёрнами наиболее продолжительна по времени и сопровождается наибольшим выделением тепла, вследствие чего величина и зона поверхностного упрочнения здесь несколько выше, чем у стандартных кругов. Вместе с тем, исследованиями не выявлено снижения микротвёрдости, что дополнительно свидетельствует о том, что в процессе резания всеми типами опытных инструментов критические температуры появления изменений или дефектов структуры металла не достигались.

Анализ результатов измерения микротвёрдости образцов труб из стали 12Х18Н10Т, обработанных отрезными шлифовальными кругами с различными направлениями ориентации зёрен (рисунок 6.16, *б*), показывает, что во всех случаях фиксируется рекристаллизация и возврат металла, наклёпанного в процессе изготовления труб, к твёрдостям, близким к твёрдости состояния поставки. При этом, наибольшие величина и глубина зоны снижения микротвёрдости наблюдаются после обработки кругами с тангенциально ориентированными зёрнами. При использовании кругов с радиально расположенными зёрнами данные показатели характеризуются наименьшими значениями. В непосред-

ственной близости от зоны резания (0,05 мм) во всех случаях наблюдается небольшое поверхностное упрочнение, обусловленное пластическими деформациями металла. Полученные результаты свидетельствуют о высоких температурах (более 500÷600 °С) непосредственно в зоне резания и вблизи от неё. При этом их влияние на микротвёрдость металла несколько уменьшается при переходе от использования кругов с тангенциально ориентированными зёрнами к кругам с радиальным их расположением.

Наиболее интересными представляются результаты исследований микротвёрдости образцов из закалённой стали ШХ15 (рисунок 6.16, *в*), поскольку этот материал, обладающий мартенситной структурой, является самым термочувствительным среди представленных. Здесь во всех случаях на образцах наблюдается частичный отпуск закалённой стали в результате действия высоких температур. Прогрев стали ШХ15 до 400÷450 °С приводит к распаду мартенсита на сорбито-троститную либо троститную структуру. При этом степень распада мартенсита и глубина частичного отпуска уменьшаются при переходе от использования отрезных шлифовальных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен к кругам с радиальным их расположением.

Результаты измерений микротвёрдости на образцах из закалённой стали ШХ15, как по характеру выявленных зависимостей, так и по абсолютным значениям снижения микротвёрдости коррелируют с исследованиями температур по цветам побежалости вблизи зоны резания (рисунок 6.14, *В*, рисунок 6.15, *в*). В целом следует констатировать, что при использовании шлифовальных кругов с радиальной ориентацией зёрен, по сравнению с обычными кругами с неориентированными зёрнами, температура прогрева в зоне резания снижается примерно на 25 °С, глубина зоны термического влияния уменьшается с 3,3 мм до 2,5 мм, а величина снижения микротвёрдости сокращается с 3600 до 2800 МПа.

Для получения полного представления о процессах, происходящих в металле при обработке отрезными шлифовальными кругами с контролируемой ориентацией зёрен, исследовалась микроструктура образцов после травления на стереомикроскопе ЛОМО МЕТАМ Р-1 (рисунок 6.17, *А, Б, В*).

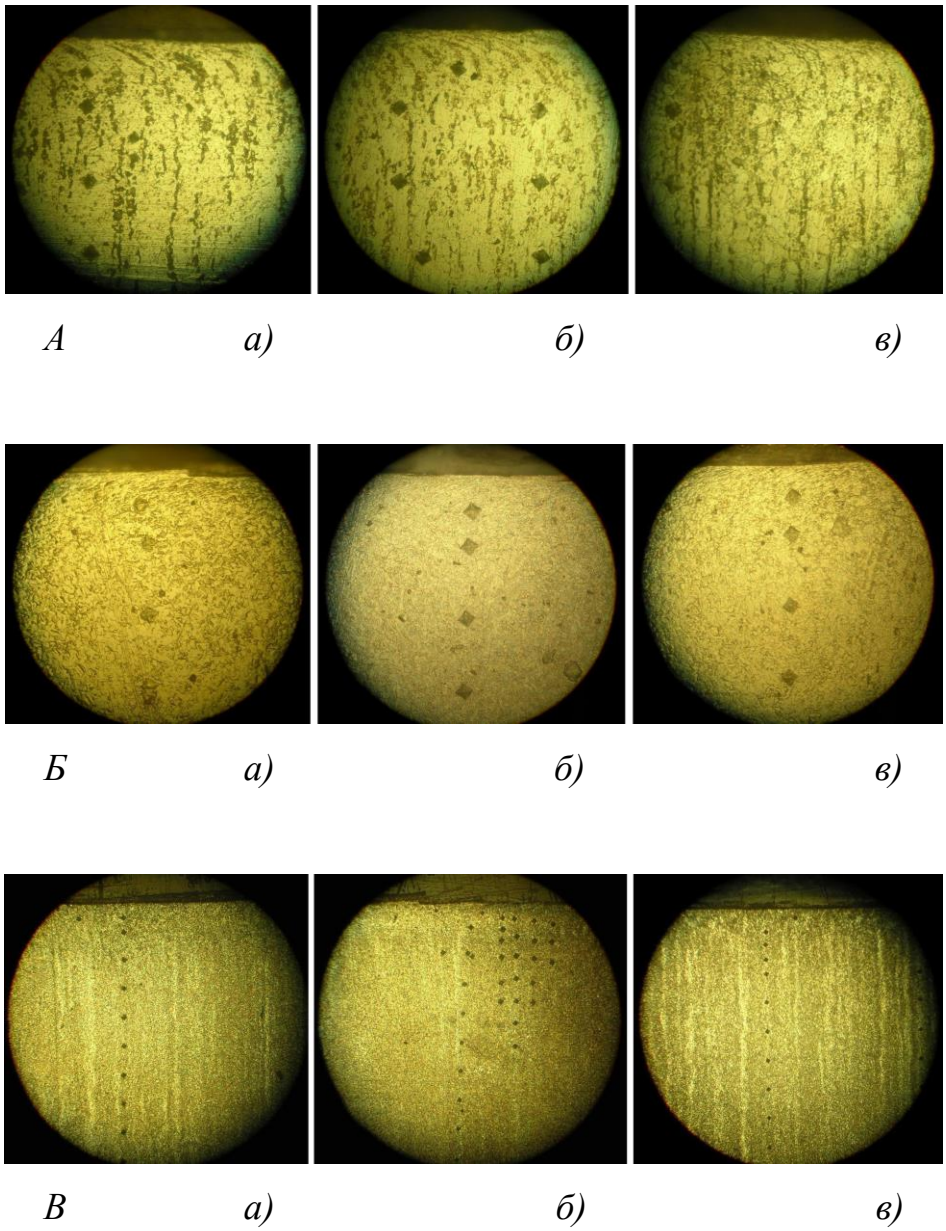


Рисунок 6.17 – Микроструктура металла в образцах из сталей 10 (*А*), 12Х18Н10Т (*Б*), ШХ15 (60 HRC) (*В*) после отрезки кругами с контролируемой ориентацией зёрен: *а)* Θ=0°; *б)* Θ=var; *в)* Θ=90°

Из фотографий (рисунок 6.17, *А*) видно, что все рассматриваемые образцы из стали 10 имеют характерную ферритно-перлитную структуру. Дефектного изменения структуры не наблюдается. Вблизи плоскости отрезки фиксируется зона поверхностного упрочнения. При этом, наиболее явно она выражена у образца, обработанного отрезным шлифовальным кругом с тангенциально ори-

ентированными зёрнами, а наименее явно – обработанного кругом с радиально расположенными зёрнами.

На фотографиях образцов из стали 12Х18Н10Т (рисунок 6.17, *Б*), обработанных отрезными кругами с контролируемой ориентацией зёрен, отчётливо фиксируется характерная структура аустенита. Каких-либо дефектов, таких как шлифовочные трещины, окислы или отслоения, не наблюдается. Отпечатки алмазной пирамиды наибольшего размера фиксируются на образце, обработанном кругом с тангенциально ориентированными шлифовальными зёрнами.

На фотографиях поверхности заготовок из стали ШХ15 (60 HRC), обработанных отрезными кругами с контролируемой ориентацией шлифовальных зёрен (рисунок 6.17, *В*), во всех случаях фиксируется плавный переход от тросто-сорбитной и троститной структуры к структуре мартенсита. Результаты измерений микротвёрдости образцов (рисунок 6.16, *в*) показывают, что данный переход происходит на расстоянии до нескольких миллиметров от зоны резания. Вследствие этого, на фотографиях (рисунок 6.17, *В*), где показано пространство от края реза на глубину порядка 1 мм, выявленное структурное изменение имеет неярко выраженный характер. В процессе проведения исследований, с целью охватить всю зону термического влияния, образцы также фотографировались при меньших увеличениях. Однако, в этом случае структура металла не была видна.

Следует также отметить, что на всех образцах зафиксирована карбидная полосчатость, возникновение которой обусловлено особенностями изготовления заготовок – процессом прокатки.

Комплексная оценка результатов проведённых исследований показывает, что целенаправленное ориентирование зёрен в шлифовальных кругах позволяет регулировать теплонапряжённость процесса резания и, тем самым, воздействовать на изменение микроструктуры и микротвёрдости металла. Так, переход от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен сопровождается увеличением их передних углов, вследствие чего снижаются деформации обрабатываемого материала и теплонапряжённость процесса шлифования.

Исследования влияния ориентации зёрен на шероховатость обрабатываемых поверхностей производилось по аналогичному алгоритму, что и при испытании шлифовальных кругов с контролируемой формой зёрен (пп. 5.2.4, 5.3.4). Измерения шероховатости по параметру R_a производились на профилографе-профилометре «Talysurf 5-120». Исследовались торцевые поверхности заготовок из стали 10, стали 12Х18Н10Т и стали ШХ15 (60 HRC), разрезанных по схеме круглого врезного шлифования кругами с ориентированными зёрнами и характеристикой Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с при скорости 80 м/с, поперечной подаче кругов 0,084 мм/об и частоте вращения заготовок 31,5 об/мин. При проведении исследований для каждого варианта ориентации зёрен в кругах и каждого обрабатываемого материала использовалось по четыре заготовки, разрезанных этими инструментами. На заготовках снималось по 12 измерений на участках торцевых поверхностей, равномерно распределённых по окружности разрезанных труб через 30°. Полученные результаты представлены в виде диаграмм на рисунке 6.18 [69, 105, 116, 143, 303].

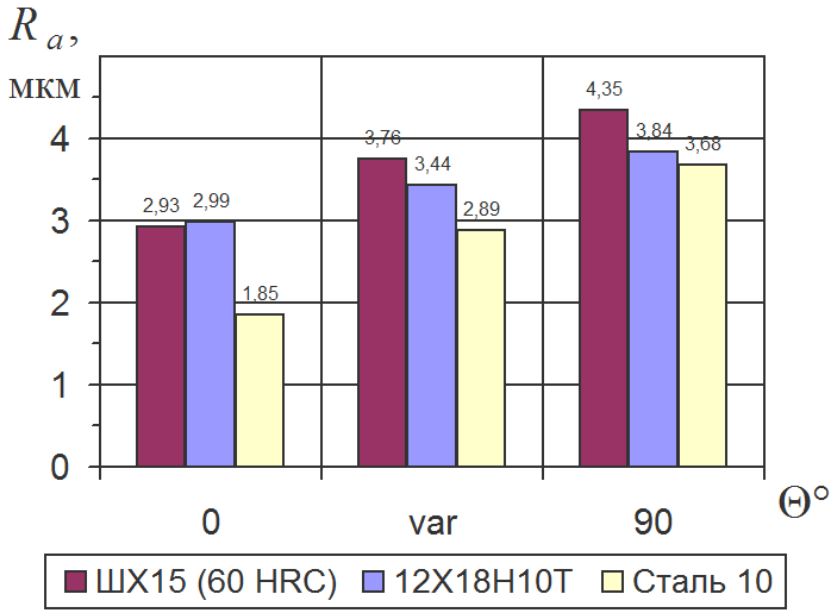


Рисунок 6.18 – Зависимость шероховатости обработанных поверхностей (R_a) от угла ориентации зёрен (Θ) после обработки по схеме круглого врезного шлифования кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с

Анализ результатов показывает, что, независимо от марки шлифуемого материала, прослеживается общий характер влияния ориентации зёрен в кругах

на шероховатость обрабатываемых поверхностей. Он выражается в том, что уменьшение или увеличение передних углов шлифовальных зёрен в кругах посредством их целенаправленной ориентации сопровождается, соответственно, снижением или увеличением шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Установлено, что при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен происходит увеличение их передних углов (п. 2.5), в результате чего шероховатость обрабатываемых поверхностей возрастает в 1,3÷2 раза в зависимости от материала заготовок. Использование шлифовальных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен (Θ=0°) позволяет снизить шероховатость поверхностей на 13÷36 % по сравнению с вариантом применения инструментов с неориентированными зёрнами (Θ=var). Использование кругов с радиальной ориентацией зёрен (Θ=90°), напротив, приводит к повышению шероховатости обрабатываемых поверхностей на 12÷27 %.

Кроме того, полученные результаты показывают, что регулирование геометрии зёрен оказывает наибольший эффект на изменение шероховатости поверхностей заготовок из стали 10 с перлитной структурой. Ориентирование зёрен в кругах в тангенциальном или радиальном направлении здесь приводит, соответственно, к уменьшению шероховатости на 36 % или её увеличению на 27 %, по сравнению с заготовками, обработанными инструментами с неориентированными зёрнами. Далее, по убыванию влияния геометрии зёрен, следует обработка заготовок из стали ШХ15 (60 HRC) с мартенситной структурой. Применение кругов с тангенциально ориентированными зёрнами приводит в данном случае к снижению шероховатости на 22 %, а применение кругов с радиальной ориентацией зёрен – к её увеличению на 17 %. Меньше всего эффект влияния ориентации зёрен на шероховатость поверхностей проявляется на заготовках из стали 12Х18Н10Т с аустенитной структурой (наиболее труднообрабатываемой из представленных). Здесь тангенциальная ориентация зёрен в кругах позволяет снизить шероховатость на 13 %, а их радиальная ориентация приводит к увеличению шероховатости на 12 %. Полученные результаты коррелиру-

ют с результатами испытаний опытных кругов с ориентированными зернами наоперации плоского шлифования [107, 117, 162, 299, 300].

Совместный анализ результатов исследований качества поверхностей заготовок, обработанных шлифовальными кругами с ориентированными зёрнами и инструментами с контролируемой формой зёрен (пп. 5.2.4, 5.3.4) показывает, что изменение передних углов зёрен посредством регуляризации их геометрии, (независимо от способа) позволяет достигать результатов, имеющих единую физическую основу и характер. Так, увеличение передних углов режущих микроклиньев во всех случаях сопровождается снижением деформаций обрабатываемых материалов, снижением теплонапряжённости процесса резания и ростом шероховатости обработанных поверхностей. Таким образом, применительно к шлифовальным кругам с ориентированными зёрнами следует, что для операций шлифования, на которых приоритетным является снижение температуры в зоне резания и деформаций обрабатываемого материала, целесообразно ориентировать зёрна в радиальном (Θ=90°) или иных направлениях, обеспечивающих высокие значения их передних углов (Θ=22,5÷90°). Для достижения минимальной шероховатости обрабатываемых поверхностей рациональным является тангенциальное ориентирование зёрен в кругах (Θ=0°). Кроме того, тангенциальное ориентирование зёрен дополнительно позволяет снизить напряжения в них при работе и, тем самым, снизить износ зёрен и износ шлифовальных инструментов в целом (пп. 2.6, 2.7, 2.8, 6.2).

6.4 Взаимосвязь эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с ориентированными зёрнами с величинами передних углов и напряжений в них, прогнозирование эксплуатационных показателей шлифовальных инструментов на этапе проектирования

Анализ результатов испытаний кругов совместно с зависимостями передних углов и напряжений в зёрнах от угла ориентации и коэффициента их фор-

мы (глава 2, модели (2.25)÷(2.26)) позволили вывести математические зависимости, отражающие взаимосвязь:

- режущей способности и эффективной мощности резания шлифовальных кругов, а также шероховатости обработанных поверхностей с передними углами зёрен;

- коэффициента шлифования инструментов с величинами максимальных напряжений в зёрнах.

Для случая обработки заготовок из стали 10 шлифовальными кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с (230×4×32 13А40Н [Θ] Т2 БУ 80 м/с) по схеме с постоянным усилием прижатия заготовок (P_y=const) полученные зависимости имеют следующий вид:

$$Q_m = 51{,}843 \cdot e^{0{,}005 \cdot \gamma}; \quad (6.10)$$

$$W_{эф} = 744{,}91 \cdot e^{0{,}003 \cdot \gamma}; \quad (6.11)$$

$$K_ш = 8{,}994 - 0{,}023 \cdot \sigma_{max}; \quad (6.12)$$

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

Теплонапряжённость процесса шлифования и шероховатость обрабатываемых поверхностей также зависят от передних углов шлифовальных зёрен. Совместный анализ полученных результатов (модели (6.1) ÷ (6.9)) и установленных зависимостей величин передних углов зёрен от направления их ориентации и коэффициента формы (глава 2) позволил получить математические модели, отражающие взаимосвязь максимальных температур в зоне резания от передних углов зёрен при обработке (по схеме с P_y=const) заготовок из сталей различных марок:

Сталь 10 $t_{max} = 421{,}39 - 1{,}120 \cdot \gamma;$ (6.13)

12Х18Н10Т $t_{max} = 780{,}10 - 2{,}279 \cdot \gamma;$ (6.14)

ШХ 15 (60 HRC) $t_{max} = 432{,}68 - 0{,}963 \cdot \gamma;$ (6.15)

Характер полученных математических моделей, а также результаты исследований микротвёрдости и микроструктуры обработанных заготовок (п. 6.3) свидетельствуют о том, что увеличивая передние углы зёрен в шлифовальном инструменте путём их целенаправленного ориентирования возможно снизить температуру резания и деформации обрабатываемого металла.

Зависимости шероховатости обработанных поверхностей (R_a) от передних углов ориентированных зёрен для случая обработки по схеме круглого врезного шлифования ($S_{\text{круга}}$=const) имеют следующий вид:

Сталь 10 $R_a = 4{,}904 \cdot e^{0{,}018 \cdot \gamma}$; (6.16)

12Х18Н10Т $R_a = 4{,}092 \cdot e^{0{,}006 \cdot \gamma}$; (6.17)

ШХ 15 (60 HRC) $R_a = 5{,}018 \cdot e^{0{,}010 \cdot \gamma}$; (6.18)

Полученные зависимости свидетельствует о том, что уменьшение передних углов зёрен посредством их целенаправленной ориентации в шлифовальных кругах позволяет снизить шероховатость обработанных поверхностей. Таким образом, показано, что управление фактором ориентации зёрен открывает перспективу повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов. При этом, на этапе проектирования инструментов, целесообразно использовать теоретические выкладки и методики исследования, изложенные в главе 2. Их актуальность подтверждается тем, что результаты оценки геометрических, прочностных и стойкостных свойств зёрен с учётом факторов их формы и ориентации коррелируют с исследования эксплуатационных показателей шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен.

В качестве примера, демонстрирующего пригодность предложенного подхода для проектирования инструментов с заданной ориентацией зёрен, в таблице 6.1 представлены величины передних углов и максимальных напряжений в зёрнах, рассчитанные в соответствии с математическими моделями (2.25)÷(2.26) для случая обработки кругами Тип 41 230×4×32 13AF46 [Θ] S BF 80 м/с заготовок из стали 10. Здесь для наглядности выбраны пять вариантов ориентации зёрен: тангенциальная ориентация (Θ=0°), неориентированные зёрна (Θ=var), радиальная ориентация (Θ=90°) и наклонная ориентация зёрен под

углами Θ=67,5° и Θ=34°. Первые три варианта ориентации позволяют сравнить величины передних углов и максимальных напряжений в зёрнах с эксплуатационными показателями шлифовальных кругов (п. 6.1÷6.3). Угол ориентации Θ=67,5° выбран в связи с тем, что для рассматриваемого случая обработки он весьма близок к направлению вектора силы резания. Ориентация под углом Θ=34° рассмотрена в связи с тем, что для исследованной фракции зёрен 13AF46 (со средним коэффициентом формы $K_ф \approx 2{,}4$) при данном расположении зёрен относительно плоскости резания фиксируются максимальные величины их передних углов.

Таблица 6.1

Угол ориентации зёрен (Θ)	Величины передних углов зёрен (γ)	Максимальные напряжения в зёрнах (σ_{max}, 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

Полученные результаты оценки передних углов и максимальных напряжений в зёрнах для случаев ориентации Θ=0°, Θ=var, Θ=90° (таблица 6.1) коррелируют с результатами оценки эксплуатационных показателей шлифовальных кругов (п. 6.1÷6.3). С ростом величин передних углов зёрен увеличивается режущая способность шлифовальных инструментов, снижаются деформации обрабатываемого материала и температуры в зоне резания, увеличивается шероховатость обработанных поверхностей. С уменьшением уровня максимальных напряжений в зёрнах повышается коэффициент шлифования, т.е. снижается износ кругов.

Анализ полученных данных (таблица 6.1) также показывает, что наиболее рациональным с точки зрения повышения режущей способности инструментов при одновременном снижении их износа и теплонапряжённости процесса резания является вариант ориентации зёрен под углами, близкими к направлению вектора силы резания. Так, при Θ=67,5° передние углы зёрен существенно больше, чем при варианте их радиальной ориентации (Θ=90°), а максимальные

напряжения значительно меньше, чем при хаотичной ориентации зёрен (Θ=var) и несколько выше, чем при их тангенциальной ориентации (Θ=0°). Следовательно, режущая способность таких инструментов будет выше, а температура резания и деформации обрабатываемого материала – ниже, чем при радиальной ориентации зёрен. При этом коэффициент шлифования и стойкость инструментов повысятся по сравнению с обычными кругами. К недостатку ориентирования зёрен соосно силе резания можно отнести повышение шероховатости обрабатываемых поверхностей ввиду увеличения передних углов зёрен.

При варианте ориентации зёрен под углом близким к Θ=34° ожидаются максимальные режущая способность кругов и шероховатость обработанных поверхностей, минимальные деформации обрабатываемого материала и температура в зоне резания, т.к. передние углы зёрен здесь наибольшие среди всех рассматриваемых случаев. При этом, коэффициент шлифования и стойкость кругов при Θ=34° могут остаться на уровне обычных инструментов с неориентированными зёрнами (Θ=var), поскольку максимальные напряжения в зёрнах здесь также находятся на близком уровне.

Полученные данные (таблица 6.1) и их анализ позволили сделать следующие выводы и рекомендации:

– целенаправленное ориентирование зёрен в шлифовальных инструментах даёт возможность изменять величины их передних углов и максимальных напряжений в них и, тем самым, повышает эксплуатационные показатели шлифовальных инструментов;

– для достижения максимальной стойкости инструментов и минимальной шероховатости обработанных поверхностей следует ориентировать зёрна в тангенциальном направлении относительно плоскости резания (Θ=0°);

– для достижения максимальной режущей способности шлифовальных инструментов, минимизации деформаций и температур в зоне резания, целесообразно располагать зёрна под углами ориентации, обеспечивающими максимальные значения их передних углов (Θ=22,5÷90°, в особенности Θ=22,5÷45°);

– с целью одновременного повышения стойкости и режущей способности шлифовальных инструментов, а также снижения деформаций обрабатываемого материала и температур в зоне резания, необходимо ориентировать зёрна под углами, близкими к направлению вектора силы резания;

– исходя из того, что соотношение составляющих силы резания P_y и P_z для различных операций шлифования, как правило, колеблется в интервале от 1,2:1 до 10:1 [182, 187, 197, 258], то рациональные углы ориентации зёрен соосно силе резания находятся в диапазоне Θ=50÷84°;

– более значимого эффекта повышения работоспособности шлифовальных инструментов можно достичь путём одновременного целенаправленного регулирования факторов формы и ориентации зёрен.

6.5 Выводы по главе 6 и практические рекомендации

1. При исследовании эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов с контролируемой ориентацией зёрен испытанию в одинаковых условиях подвергались три типа кругов: круги с радиальной и тангенциальной ориентацией зёрен (с упрочняющими элементами (УЭ) и без них), а также круги с неориентированными зёрнами (в качестве сравнительного эталона). Испытания проводились по схеме резания с постоянным усилием прижатия заготовок к инструментам (круги с и без УЭ) и по схеме круглого врезного шлифования (круги с УЭ). Условия испытаний включали в себя предварительно подобранные рациональные режимы резания: усилия прижатия заготовок к инструментам (при схеме с P_y=const), а также поперечная подача кругов и частота вращения заготовок (при схеме с $S_{круга}$=const).

2. В результате экспериментов установлено, что при переходе от тангенциальной (Θ=0°) к радиальной ориентации зёрен (Θ=90°) режущая способность шлифовальных кругов возрастает в 1,1÷1,27 раза, в зависимости от наличия УЭ, схемы и режимов резания, а также обрабатываемого материала. При этом, режущая способность кругов с тангенциально ориентированными зёрнами на

8,8 % (без УЭ) и на 3,9÷8,2 % (с УЭ) ниже, чем у обычных кругов с неориентированными зернами. Режущая способность отрезных кругов с радиальной ориентацией, напротив, на 13,9 % (без УЭ) и на 6,6÷17,4% (с УЭ) выше, чем у стандартных инструментов. Высокая режущая способность кругов с радиальной ориентацией зёрен объясняется наличием у таких зёрен более острых передних углов и тем, что на единице рабочей поверхности инструмента число режущих кромок больше, чем при другом направлении ориентации. Это способствует срезанию больших объёмов металла в единицу времени. Установлено также, что схема шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок в 9÷15 раз более производительна, чем схема с постоянной подачей кругов. Кроме того, среди испытанных обрабатываемых материалов всеми типами кругов лучше всего шлифуется сталь 10, далее следует сталь ШХ15 и хуже всех обрабатывается сталь 12Х18Н10Т.

3. Установлено, что коэффициент шлифования кругов с радиальной ориентацией зёрен в 1,64 раза (без УЭ) и в 1,4÷1,8 раза (с УЭ) ниже, чем у кругов с тангенциальной ориентацией зёрен (в зависимости от схемы резания, а также обрабатываемого материала). При этом у кругов с радиальной ориентацией коэффициент шлифования на 20,6 % (круги без УЭ) и на 15,2÷30,7 % (круги с УЭ) ниже, чем у стандартных инструментов. У кругов с тангенциальной ориентацией, напротив, коэффициент шлифования на 30,4 % (круги без УЭ) и на 20,9÷28,9 % (круги с УЭ) выше, чем у обычных инструментов с неориентированными зёрнами. Причиной снижения коэффициентов шлифования отрезных кругов при переходе от тангенциального (Θ=0°) к радиальному направлению ориентации шлифовальных зёрен (Θ=90°) является повышение уровня напряжений в зёрнах и, как следствие, интенсификация износа последних. При этом во всех случаях выявлено более значительное влияние ориентации зёрен на коэффициент шлифования кругов, чем на их режущую способность. Кроме того, сравнение коэффициентов шлифования при различных схемах резания показывает, что при постоянной подаче кругов данный показатель в 1,8÷2,6 раза выше, чем при постоянном усилии прижатия заготовок.

4. Установлено, что при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен в кругах при схеме шлифования с постоянным усилием прижатия заготовок к инструменту эффективная мощность резания возрастает в 1,12÷1,55 раза в зависимости от наличия УЭ, режимов резания и обрабатываемого материала. Так, эффективная мощность резания кругами с тангенциальной ориентацией зёрен на 17,1 % (круги без УЭ) и на 4,8÷4,9 % (круги с УЭ) ниже, чем у обычных инструментов. У кругов с радиальной ориентацией зёрен этот показатель на 28,6 % (круги без УЭ) и на 6,3÷10,6 % (круги с УЭ) выше, чем при работе стандартными инструментами. Полученные результаты объясняются тем, что увеличение передних углов шлифовальных зёрен, в данном случае, – за счёт их ориентации в инструменте, приводит к снижению деформаций обрабатываемого материала. При схеме шлифования с P_y=const это выражается в увеличении сечения срезаемых стружек, ощутимом росте режущей способности шлифовальных кругов и увеличении эффективной мощности резания.

5. Установлено, что при переходе от тангенциальной (Θ=0°) к радиальной (Θ=90°) ориентации зёрен в кругах при схеме круглого врезного шлифования эффективная мощность резания снижается в 1,35÷1,59 раза в зависимости от обрабатываемого материала. Эффективная мощность резания кругами с тангенциальной ориентацией зёрен здесь на 5,6÷19,4 % выше, чем у обычных инструментов из неориентированных зёрен (Θ=var). У шлифовальных кругов с радиальной ориентацией зёрен эффективная мощность резания, напротив, на 21,5÷24,8 % ниже, чем у стандартных инструментов. Полученные результаты находят объяснение в том, что увеличение передних углов зёрен (в данном случае, – за счёт их ориентации в инструменте) при шлифовании с постоянной подачей кругов, когда толщины срезаемых стружек практически неизменны, приводит к снижению сил резания. Полученные результаты имеют общую физическую основу с характером влияния геометрии режущих клиньев лезвийных инструментов на составляющие силы резания.

6. Установлено, что увеличение передних углов зёрен посредством их целенаправленной ориентации независимо от схемы и режимов шлифования, а также от обрабатываемого материала, позволяет повысить режущую способность инструментов и уменьшить время обработки, что приводит к снижению общих энергозатрат. Обусловлено это тем, что весьма значительную долю (более половины) от общих энергозатрат при шлифовании составляют мощности, затрачиваемые на холостой ход кругов и на вращение заготовок.

7. Установлено, что при испытаниях опытных кругов по схеме шлифования с постоянным усилием прижатия между инструментом и заготовкой (P_y=const) увеличение передних углов зёрен в инструменте за счёт их ориентации приводит к снижению деформаций обрабатываемого материала, увеличению толщины срезаемых стружек и, как результат, к существенному росту составляющей силы резания P_z. При переходе от тангенциальной ориентации абразивных зёрен в шлифовальных кругах (Θ=0°) к радиальному их расположению (Θ=90°), составляющая P_z возрастает в 1,12÷1,16 раза при обработке заготовок из различных сталей на скорости 80 м/с и в 1,55 раза при обработке заготовок из стали 10 на скорости 50 м/с. При этом, соотношение составляющих силы резания P_y/P_z пропорционально уменьшается при переходе от кругов с тангенциальной ориентацией зерен к инструментам с их радиальным расположением. Уменьшение соотношений P_y/P_z при переходе от кругов с тангенциальной ориентацией зерен к инструментам с их радиальным расположением происходит с 4,7 до 3 раз при работе инструментами без упрочняющих стеклосеток на скорости 50 м/с и с 4÷5,2 до 3,6÷4,5 раз при работе инструментами, армированными стеклосетками, при скорости 80 м/с.

8. Установлено, что радиальное ориентирование зёрен в инструменте (Θ=90°) с целью повышения передних углов режущих микроклиньев, снижения за счет этого деформаций и температур обрабатываемого материала, а также повышения производительности обработки при шлифовании не является оптимальным вариантом ориентации зёрен. Более значительных результатов можно достичь ориентируя зёрна наклонно, вершинами навстречу составляющей силы

резания P_z. При отрезном шлифовании заготовок из стали 10 рациональный угол ориентации зёрен в кругах в соответствии с направлением действия силы резания находится в диапазоне Θ=72°÷78° (в среднем Θ=75°), а при шлифовании заготовок из стали 12Х18Н10Т и ШХ15 (60 HRC) рациональный угол ориентации зёрен составляет Θ=77°÷79° (в среднем Θ=78°).

9. По результатам подробного рассмотрения схемы нагружения абразивных зёрен от действия силы резания P и её составляющих P_y и P_z установлено, что наиболее рациональными с точки зрения прочности зёрен являются два варианта их ориентирования: тангенциальная ориентация (Θ=0°) и ориентация зёрен наибольшими осями по направлению действия силы резания P, когда зёрна испытывают преимущественно сжимающие нагрузки. Физическая основа этого состоит в том, что абразивные материалы характеризуются в десять и более раз более высокими пределами прочности на сжатие по сравнению с их же пределами прочности на изгиб. Соответственно, абразивные зёрна из этих материалов хорошо работают на сжатие, например при тангенциальном варианте их ориентации и разрушаются при существенно меньших усилиях в случаях, когда неоптимальная ориентация зёрен приводит к росту в них изгибающих нагрузок.

10. Установлено, что при переходе от тангенциальной ориентации зерен к радиальному расположению их в круге общая теплонапряженность процесса резания и степень нагрева заготовок снижается. В плоскости отрезки температура резания кругами с радиальной ориентацией зёрен на 47 °С, а на расстоянии l = 3 мм от этой плоскости на ≈ 70 °С меньше, чем при резании кругами с тангенциальной ориентацией (для стали 10). Это явление для разных сталей описывается экспоненциальными зависимостями (6.1) ÷ (6.9). Таким образом, целенаправленное ориентирование зёрен в шлифовальных кругах позволяет регулировать теплонапряженность процесса резания. Так, применение отрезных кругов с радиальной ориентацией зёрен по сравнению с обычными кругами позволяет снизить температуру в зоне резания на 20÷70 °С и существенно сократить размеры зон термического влияния. При этом, чем выше вязкость обраба-

тываемого материала, тем больше достигаемый эффект. Полученные результаты объясняются тем, что при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен происходит увеличение их передних углов, за счёт чего снижаются деформации обрабатываемого материала и сопутствующее им тепловыделение.

11. При исследовании микротвердости и микроструктуры образцов заготовок после обработки шлифовальными кругами с разной ориентацией зёрен подтверждено, что величины и глубины зон термического влияния и деформации обрабатываемого материала уменьшаются при переходе от использования кругов с тангенциальной ориентацией зёрен к кругам с радиальным их расположением. При этом, во всех случаях температура прогрева образцов не превышала значений возникновения дефектов структуры в виде трещин и прижогов.

12. Установлено, что при переходе от тангенциальной к радиальной ориентации зёрен в кругах шероховатость обрабатываемых поверхностей возрастает в 1,3÷2 раза в зависимости от материала заготовок. Объясняется это увеличением передних углов зёрен и снижением выглаживающих деформаций обрабатываемых материалов. Так, использование кругов с радиальной ориентацией зёрен (Θ=90°), приводит к повышению шероховатости обрабатываемых поверхностей на 12÷27 %, по сравнению с вариантом применения инструментов с неориентированными зёрнами (Θ=var). В то же время, использование шлифовальных кругов с тангенциальной ориентацией зёрен (Θ=0°) позволяет снизить шероховатость поверхностей на 13÷36 %, по сравнению с обычными инструментами. Кроме того, установлено, что регулирование геометрии зёрен оказывает наибольший эффект на изменение шероховатости поверхностей заготовок с перлитной структурой. Далее, по убыванию влияния, следует обработка заготовок с мартенситной структурой. Меньше всего ориентации зёрен влияет на шероховатость поверхностей заготовок со структурой аустенита.

13. Установлено, что подбор и упорядочение геометрии шлифовальных зёрен, (независимо от способа) позволяет достигать результатов, имеющих единую физическую основу и характер. Увеличение передних углов режущих мик-

роклиньев во всех случаях сопровождается снижением деформаций шлифуемых материалов и теплонапряжённости процесса резания, ростом режущей способности инструментов и увеличением шероховатости обработанных поверхностей. Уменьшение уровня напряжений в зёрнах при работе за счёт подбора их формы и ориентации позволяет повысить их стойкость и снизить износ инструментов. Применительно к шлифовальным кругам с ориентированными зёрнами из этого следует, что для операций шлифования, на которых приоритетным является повышение производительности обработки, снижение температуры в зоне резания и деформаций обрабатываемого материала, целесообразно ориентировать зёрна в радиальном (Θ=90°) или близких направлениях, обеспечивающих высокие значения их передних углов (Θ=22,5÷90°). Для минимизации износа инструментов и шероховатости обрабатываемых поверхностей рациональным является тангенциальное ориентирование зёрен в кругах (Θ=0°).

14. Получены зависимости (6.10÷6.18), отражающие взаимосвязь:

– режущей способности и эффективной мощности резания шлифовальных кругов с ориентированными зёрнами, а также шероховатости обработанных поверхностей с передними углами зёрен;

– коэффициента шлифования инструментов с величинами максимальных напряжений в зёрнах.

15. На базе разработанной методологии по изучению влияния факторов формы и ориентации зёрен на их эксплуатационные показатели (глава 2), а также полученных практических результатов комплексных испытаний шлифовальных кругов с контролируемой формой и ориентацией зёрен (главы 5 и 6) предлагается алгоритм формирования требуемой геометрии зёрен в инструментах. Суть его состоит в том, что для повышения эффективности процесса шлифования и максимального использования потенциальных возможностей зёрен целесообразно при изготовлении шлифовальных инструментов одновременного задействовать и регулировать факторы формы и ориентации зёрен, исходя из приоритетных задач конкретной операции шлифования и последующих условий эксплуатации инструментов.

16. Для новых конструкций инструментов полезно расширить их характеристику, введя сюда, наряду с маркой абразива, зернистостью, твёрдостью, типом связки и другими показателями также коэффициент формы зёрен [$K_ф$] и угол их ориентации [Θ]. Для шлифовальных кругов такая расширенная характеристика может выглядеть, например, следующим образом: Тип 41 230×3×32 13AF30 $K_ф$2,77 Θ45° Q BF 80 м/с, где $K_ф$2,77 – величина коэффициента формы зёрен в круге, Θ45° – угол ориентации зёрен в круге по отношению к плоскости резания.

17. Для кругов с наклонной ориентацией зёрен важно указывать (стрелкой) предпочтительное направление их вращения, что будет гарантировать наиболее выгодное расположение зёрен в теле инструмента – т.е. вершинами навстречу обрабатываемому металлу (вектору силы резания).

18. Для наиболее ответственных случаев шлифования, где предъявляются высокие требования к режущей способности и стойкости инструментов, а также к температурам в зоне резания, можно вычислить точный угол ориентации зёрен, например, путём использования, двухкомпонентного динамометра. Измерение составляющих силы резания (P_y, P_z) при шлифовании детали на рассматриваемой операции позволяет определить по их соотношению угол наклона вектора силы резания. Такой угол (вместе с подобранной формой зёрен), будучи заложенным в конструкцию изготавливаемых шлифовальных инструментов, обеспечит максимальное использование эксплуатационных возможностей как самих зёрен, так и инструмента в целом.

19. Несколько увеличенные затраты на изготовление инструментов с контролируемой формой и ориентацией зёрен быстро окупятся благодаря их более высокой работоспособности по сравнению со стандартными инструментами.

20. Разработаны рекомендации по повышению эффективности различных видов шлифования на основе применения инструментов с двумя контролируемыми и управляемыми факторами – формой и ориентацией зёрен, распространяющиеся в первую очередь на шлифовальные круги, а также другие абразивные инструменты. Рекомендации сведены в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Рекомендации по повышению эффективности различных видов шлифования за счёт управления формой и ориентацией зёрен в инструментах.

Вид абразивной обработки	Управление формой и ориентацией зёрен		Достигаемый эффект
	$K_ф$	Θ	
1	2	3	4
Скоростное шлифование	Увеличение $K_ф$ 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 $K_ф$ зёрен	Тангенциальная ориентация зёрен	Повышение прочности зёрен и стойкости кругов, изготовленных из них; возможность эксплуатации инструментов при повышенных силовых нагрузках
Отрезное и глубинное шлифование	Увеличение $K_ф$ зёрен	Радиальная или наклонная ориентация зёрен	Повышение производительности и снижение теплонапряжённости шлифования
Чистовое шлифование	Уменьшение $K_ф$ 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 $K_ф$ зёрен	Радиальная или наклонная ориентация зёрен	Снижение температуры резания, повышение режущей способности инструментов

Из таблицы 6.2 следует, что:

– для повышения эффективности скоростного шлифования (увеличения прочности инструментов и скорости резания) целесообразно изготавливать и применять шлифовальные круги на полимерных связующих с увеличенными значениями коэффициентов формы в зоне посадочного отверстия и с тангенциальной ориентацией зёрен;

– для повышения работоспособности инструментов, используемых для силового и обдирочного шлифования (повышения стойкости кругов и режимов резания), следует изготавливать их из зёрен с малыми значениями $K_ф$ и тангенциальной ориентацией зёрен в теле инструментов;

– повысить эффективность отрезного и глубинного шлифования (увеличить режущую способность инструментов, снизить температуру резания и деформации обрабатываемого материала) можно путём применения шлифоваль-

ных кругов с увеличенными значениями $K_ф$ зёрен и их радиальной или наклонной ориентацией в теле этих инструментов;

– для повышения эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов (снижения шероховатости обрабатываемых поверхностей), применяемых для чистового шлифования, их следует изготавливать из зёрен с малыми значениями $K_ф$ и их тангенциальной ориентацией, что дополнительно позволяет снизить износ инструментов;

– повышение эффективность заточных операций (снижение температуры резания и увеличение режущей способности инструментов), может быть реализовано путём использования шлифовальных кругов с большими значениями коэффициентов формы зёрен и их радиальной или наклонной ориентацией.

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 ($K_ф$), 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 ориен-

тации зёрен в теле инструмента введён параметр «угол ориентации зёрен Θ», 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 $K_ф$ 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 $K_ф$ 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 π и установлено, что:

– с увеличением коэффициента формы шлифовальных зёрен в диапазоне углов ориентации Θ=10°÷125° их передние углы возрастают, а для тангенциально ориентированных зёрен (Θ=0°(180°)) и зёрен с близкими направлениями ориентации (Θ=135°÷180°) наблюдается обратная тенденция;

– передние углы зёрен достигают максимальных значений при их ориентации вершинами навстречу силе резания (Θ=22,5°÷90°, в особенности при Θ=22,5°÷45°); минимальные значения передних углов достигаются при тангенциальной ориентации зёрен (Θ=0°(180°)) и ориентации вершинами по направлению P_z (100°÷180°);

– максимальные напряжения в зёрнах возрастают с увеличением их коэффициентов формы при всех углах ориентации, достигают минимальных зна-

чений при наименьших $K_ф$, 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 $K_ф$ 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 приспособления 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 $K_ф$ 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 $K_ф$ и ориентировать их в тангенциальном направлении (Θ=0°);

– 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 $K_ф$ и ориентировать их в радиальном направлении (Θ=90°);

– 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 $K_ф$, и зёрен, ориентированных в радиальном (Θ=90°) или близком к нему направлениях (Θ=22,5°÷90°, в особенности, при Θ=22,5°÷45°), 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 зерен соосно силе резания находятся в диапазоне Θ = 50÷84°;

– при отрезном шлифовании заготовок из стали 10 рациональный угол ориентации зёрен в кругах в соответствии с направлением действия силы резания находится в диапазоне Θ=72°÷78° (в среднем Θ=75°), а при шлифовании заготовок из стали 12Х18Н10Т и ШХ15 (60 HRC) рациональный угол ориентации зёрен составляет Θ=77°÷79° (в среднем Θ=78°).

– для новых конструкций кругов целесообразно расширить их характеристику, введя дополнительно коэффициент формы зёрен [$K_ф$] и угол их ориентации [Θ], 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 электротехнической 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абидов, Р. А. Исследование и разработка нового метода для определения механической прочности алмазно-абразивного зерна : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1968. – 21 с.
2. Абразивный и алмазный инструмент / под ред. Ю. М. Ковальчука. – Москва : НИИмаш, 1969. – 58 с.
3. Абразивная и алмазная обработка. Справочник / под ред. А. Н. Резникова. – Москва : Машиностроение, 1977. – 391 с.
4. Абразивные материалы и инструменты. Каталог / под. ред. В. Н. Тыркова. – Москва : ВНИИТЭМР, 1986. – 358 с.
5. Абразивные материалы и инструменты. Каталог-справочник. – Москва : НИИ информации по машиностроению, 1976. – 389 с.
6. А.с. 694358 СССР, М. Кл^{3}. B24D5/00. Абразивный инструмент / Н. Б. Урьев, В. П. Клименко, Ю. М. Ковальчук и др. – № 2609458/25-08; заявл. 26.04.78; опубл. 30.12.79, Бюл. № 40. – 2 с.
7. А.с. 339323 СССР, М. Кл^{5}. B07B13/00. Вибрационный классификатор сыпучих материалов / В. А. Назаренко, В. А. Вишняков, Ю. Л. Свяцкий. – № 1401665/29-33; заявл. 12.01.70; опубл. 24.05.72, Бюл. № 17. – 3 с.
8. А.с. 2018383 СССР, М.Кл.^{5} B07B13/11. Вибрационный сепаратор / П. М. Заика, Л. И. Кайшева – № 4932856/03; заявл. 30.04.91: опубл. 30.08.94, Бюл. № 14. – 3 с.
9. А.с. 411923 СССР, М. Кл^{5}. B07B13/00. Вибросепаратор. – № 1858375/30-15; заявл. 18.12.72; опубл. 25.01.74, Бюл. № 3. – 3 с.
10. А.с. 1495100 СССР, М. Кл^{3}. B24D5/00. Способ изготовления абразивного инструмента / Б. Н. Бирюков, И. М. Буюкли, Л. В. Попова и др. – № 4281271/31-08; заявл. 13.07.87; опубл. 23.07.89, Бюл. № 27. – 3 с.
11. А.с. 582957 СССР, М. Кл^{3}. B24D3/00. Способ изготовления абразивного инструмента / В. И. Зайцев. – № 2198300/25-08; заявл. 11.12.75; опубл. 05.12.77, Бюл. № 45. – 2 с.

12. А.с. 841947 СССР, М. Кл^{3}. B24D5/00. Способ изготовления абразивного инструмента из немагнитных материалов / Ю. М. Ермаков, А. В. Краснов. – № 2807851/25-08; заявл. 16.08.79; опубл. 30.06.81, Бюл. № 24. – 5 с.
13. А.с. 878555 СССР, М. Кл^{3}. B24D5/06. Способ изготовления абразивного инструмента с ориентированными зёрнами / Р. Б. Мартиросян, Г. Л. Петросян, Г. С. Аноян. – № 2628922/25-08; заявл. 16.06.78; опубл. 07.11.81, Бюл. № 41. – 3 с.
14. А.с. 427851 СССР, М. Кл^{3}. B24D5/14. Способ изготовления абразивных инструментов / В. И. Меламед, А. М. Сарайкин, В. А. Гудзик и др. – № 1718202/25-08; заявл. 29.11.71; опубл. 15.05.74, Бюл. № 18. – 1 с.
15. А.с. 454991 СССР, М. Кл^{3}. B24D5/00. Способ изготовления алмазно-абразивного инструмента / В. Ф. Шаталов, А. Я. Новак. – № 1881683/25-08; заявл. 12.02.73; опубл. 30.12.74, Бюл. № 48. – 1 с.
16. А.с. 280265 СССР, М. Кл^{1}. B24D11/00. Способ изготовления шлифовальной шкурки / Б. А. Глаговский, И. В. Лавров, Г. Ш. Ротштейн, И. В. Чиряев. – № 1370327/25-08; заявл. 13.09.69; опубл. 26.08.70, Бюл. № 27. – 1 с.
17. А.с. 1318299 СССР, М. Кл^{3}. B03C07/08. Устройство для электросепарации семян / Б. И. Шихсаидов, А. Х. Бекеев, А. М. Мурзаев и др. – № 3998560/22-03; заявл. 25.10.85; опубл. 25.06.87, Бюл. № 23. – 3 с.
18. А.с. 465319 СССР, М. Кл^{3}. B24D11/00. Электроосадительная установка для изготовления шлифовальных лент / И. В. Чиряев, Б. А. Глаговский, Г. Ш. Ротштейн и др. – № 1612490/25-08; заявл. 12.01.71; опубл. 30.03.75, Бюл. № 12. – 2 с.
19. Анахин, В. Д. Вибрационные сепараторы / В. Д. Анахин, Д. А. Плисс, В. Н. Монахов. – Москва : Недра, 1991. – 157 с.
20. Анахин, В. Д. Вибрационная сепарация порошкообразных материалов. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1993. – 207 с.
21. Бабичев, А. П. Вибрационная обработка деталей. – Москва : Машиностроение, 1974. – 133 с.

22. Байдакова, Н. В. Выбор основных параметров и конструктивных особенностей виброклассификатора типа ВДК для рассева абразивных материалов по форме / Н. В. Байдакова, В. А. Назаренко, С. А. Крюков // Тяжелое машиностроение. – 2016. – № 10. – С. 18–20.
23. Байдакова, Н. В. О принципах управления технологической частью классификатора типа ВДК на операциях спецрассева абразивных материалов / Н. В. Байдакова, В. А. Назаренко, С. А. Крюков // Справочник. Инженерный журнал – 2023. – №5. – С. 3–7.
24. Байдакова, Н. В. Повышение эффективности шлифования путем применения инструмента из классифицированного по размеру и по форме абразивного зерна : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2006. – 16 с.
25. Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов. – Киев : Наукова думка, 1978. – 204 с.
26. Бакуль, В. Н. Эффективность промышленного применения синтетических алмазов / В. Н. Бакуль, Б. И. Гинзбург. – Киев : УкрНИИПТИ, 1965. – 51 с.
27. Барадай, В. Н. О фрикционной сепарации сыпучих материалов / В. Н. Барадай, С. Н. Кононейко // Труды ВНИИЗ. – Москва : Машиностроение. 1974. – 169 с.
28. Бердников, В. Ф. Разработка микромеханических методов исследования абразивных материалов с целью оценки их износостойкости : дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1986. – 255 с.
29. Бокучава, Г. В. Износ и стойкость абразивного инструмента : автореф. дис. … докт. техн. наук. – Тбилиси, 1968. – 25 с.
30. Братан, С. М. Повышение качества деталей при шлифовании в условиях плавучих мастерских : монография / С. М. Братан, Е. А. Владецкая, Д. О. Владецкий, А. О. Харченко. – Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2018. – 153 с.
31. Братан, С. М. Технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительного чистового тонкого шлифования : дис. … докт. техн. наук. – Одесса, 2006. – 321 с.

32. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – 11-е изд., стер. – Москва : Изд-во «Наука», 1967. – 608 с.

33. Бушуев, В. В. Практика конструирования машин : Справочник. – Москва : Машиностроение, 2006. – 448 с.

34. Быковский, И. И. Основы теории вибрационной техники. – Москва : Машиностроение, 1968. – 362 с.

35. Ваксер, Д. Б. Алмазная обработка технической керамики / Д. Б. Ваксер, В. А. Иванов, Н. В. Никитков, В. Б. Рабинович. – Ленинград : Машиностроение, 1976. – 159 с.

36. Ваксер, Д. Б. Исследование влияния геометрии абразивного зерна и однородности зернового состава на эффективность шлифования : дис. … канд. техн. наук. : – Ленинград, 1961. – 163 с.

37. Ваксер, Д. Б. Пути повышения производительности при шлифовании. – Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1964. – 123 с.

38. Василенко, П. М. Теория движения частиц по шероховатой поверхности. – Киев : УАСХИ, 1960. – 141 с.

39. Васин, С. А. Резание материалов / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.

40. Верещака, А. С. Работоспособность режущего инструмента. – Москва : Машиностроение, 1993. – 335 с.

41. Власов, В. И. Управление физическими процессами обработки / В. И. Власов, О. А. Шарипов. – Москва : ИЦ МГТУ «СТАНКИН», 2005. – 100 с.

42. Власов, В. И. Процессы и режимы резания конструкционных материалов. Справочник. – Москва : Изд-во «ИТО», 2007. – 189 с.

43. Волский, Н. И. Обрабатываемость материалов шлифованием. – Ленинград : МАШГИЗ, 1950. – 72 с.

44. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике. – Москва : Гос-е изд-во технико-теоретической литературы, 1957. – 783 с.

45. Вырезуб, В. Н. Шлифование абразивными лентами. – Москва : Машиностроение, 1972. – 104 с.
46. Гаршин А. П. Абразивы и материалы конструкционного назначения на основе карбида кремния / А. П. Гаршин, В. М. Шумячер, О. И. Пушкарев. – Волжский : ВолГАСУ, 2008. – 188 с.
47. Глейзер, Л. А. О сущности процесса шлифования : в 2-х томах : дис. … докт. техн. наук. – Москва, 1955. – 363 с.
48. Горшков, Ю. Б. Исследование и научные основы применения микрокритсалличиских прокатанных электрокорундов в абразивных кругах : дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1977. – 162 с.
49. Горячкин, Ю. Б. Исследование взаимосвязи зерна и связки шлифовальных инструментов при статических нагрузках : дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1972. – 232 с.
50. ГОСТ 4559–2017. Бакелит жидкий. Технические условия. – Введ. 2018–10–01. – Москва : Стандартинформ,, 2018. – 12 с.
51. ГОСТ 30513–97. Инструмент абразивный и алмазный. Методы испытаний на безопасность. – Введ. 1999–07–01. – Москва: Изд-во стандартов, 1998. – 7 с.
52. ГОСТ Р 52588–2011. Инструмент абразивный. Требования безопасности. – Введ. 2013–01–01. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 15 с.
53. ГОСТ 10561–80. Криолит искусственный технический. Технические условия. – Введ. 1982–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – 34 с.
54. ГОСТ 21963–2002. Круги отрезные. Технические условия. – Введ. 2004–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 2003. – 25 с.
55. ГОСТ Р 57978–2017. Круги отрезные. Технические условия. – Введ. 2019–01–01. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 17 с.
56. ГОСТ Р 52781–2007. Круги шлифовальные и заточные. Технические условия. – Введ. 2007–11–29. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 32 с.
57. ГОСТ 2424–83. Круги шлифовальные. Технические условия. – Введ. 1985–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1983. – 39 с.

58. ГОСТ Р 52381–2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. – Введ. 2005–10–27. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 15 с.
59. ГОСТ 27595–88. Материалы шлифовальные и инструменты абразивные. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение. – Введ. 1989–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1989. – 11 с.
60. ГОСТ 3647–80. Материалы шлифовальные. Классификация. Зернистость и зерновой состав. Методы контроля. – Введ. 1982–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – 19 с.
61. ГОСТ 28924–91. Материалы шлифовальные. Методы определения физических и физико-механических свойств. – Введ. 1992–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 13 с.
62. ГОСТ 9206–80. Порошки алмазные. Технические условия. – Введ. 1981–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1980. – 55 с.
63. ГОСТ Р 52370–2005. Порошки из природных алмазов. Технические условия. – Введ. 2005–09–07. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 31 с.
64. ГОСТ 12.3.028–82. Процессы обработки абразивным и эльборовым инструментом. Требования безопасности. – Введ. 1983–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1982. – 10 с.
65. ГОСТ 127.1–93. Сера техническая. Технические условия. – Введ. 1997–01–01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1996. – 10 с.
66. ГОСТ 20907–2016. Смолы фенолформальдегидные жидкие. Технические условия. – Введ. 2017–11–01. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 21 с.
67. ГОСТ 18694–2017. Смолы фенолформальдегидные твёрдые. Технические условия. – Введ. 2018–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 16 с.
68. 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.

69. 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.

70. Гришин, Г. Р. Исследование влияния процесса правки шлифовального круга на производительность процесса / Г. Р. Гришин, Д. П. Слова, П. М. Салов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2020. – т. 2, № 2. – С. 86–90.

71. Гришин, Г. Р. Разработка технологии упрочнения абразивных кругов на керамической связке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – т. 18, № 4. – С. 15–20.

72. Гуревич, А. С. Оборудование для производства абразивных инструментов : Москва – Ленинград : Машиностроение, 1964. – 260 с.

73. Гюринг, К. Метод повышения производительности шлифования путём повышения скорости резания : пер. с нем. яз. / ВНИИАШ. – Аахен, 1967. – 255 с.

74. Давыдова, Г. Е. Исследование прочностных свойств абразивов и алмаза и их взаимодействия с обрабатываемыми материалами : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Тбилиси, 1973. – 32 с.

75. Димов, Ю. В. Обработка деталей полимерно-абразивными щетками : монография / Ю. В. Димов, Д. Б. Подашев. – Иркутск : Изд-во ИрНИТУ, 2020. – 317 с.

76. Димов, Ю. В. Обработка деталей свободным абразивом. – Иркутск : Изд-во ИрГТУ, 2000. – 293 с.

77. Дубина, Д. Р. Определение параметров поверхности абразивного инструмента / Д. Р. Дубина, А. В. Авилов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 3. https://science-education.ru/article/view?id=6361

78. Дубов, Г. М. Повышение работоспособности отрезных шлифовальных кругов на основе использования зёрен с контролируемой формой : дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2004. – 163 с.

79. Евсеев, Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 129 с.

80. Евсеев, Д. Г. Модели шлифования. Теория и эксперимент / Д. Г. Евсеев, А. Н. Сальников. – Москва : Известия, 2018. – 311 с.

81. Заика, П. М. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. – Москва : Колос, 1978. – 130 с.

82. Зайцев, А. Г. Разработка научных основ управления строением алмазно-абразивного инструмента и его влияние на эффективность обработки : автореф. дис. … докт. техн. наук. – Минск, 1982. – 41 с.

83. Зайцев, А. Г. Экспериментальное и теоретическое исследование шлифования новых твердых сплавов синтетическими алмазными кругами повышенного качества : дис. … канд. техн. наук. – Воронеж, 1968. – 187 с.

84. Захидов, С. Х. Исследование прочности удержания зёрен в связке при температурно-силовых воздействиях : дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1974. – 212 с.

85. Ибатуллин, И. Д. Динамическое упрочнение и балансировка абразивных кругов для высокоскоростного шлифования методом детонационного напыления / И. Д. Ибатуллин, Р. Г. Гришин, А. Г. Шараухова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011., т. 18, № 4 (6). – С. 1062–1067.

86. Иванова, Т. Н. Повышение эффективности торцового алмазного шлифования пластин из труднообрабатываемых сталей на основе изменения температурно-силовых условий процесса : дисс. ... докт. техн. наук. – Пенза, 2014. – 418 с.

87. Износ абразивных зёрен шлифовального круга / С. Кавамура, Х. Ямада, К. Кубо // ВЦП – №Ц-24473 : пер. с яп. яз. – Сэймицу кикай, 1973. Т. 39. – № 3. – С. 306–311.

88. Ильичев, Л. Л. Исследование влияния структуры шлифовальных лент на параметры процесса шлифования : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1975. – 20 с.

89. Ипполитов, Г. М. Абразивные инструменты и их эксплуатация. – Москва : МАШГИЗ, 1959. – 255 с.

90. Испытание прочности алмазных зёрен / С. Комине, А. Охара // ВЦП – №Ц-56600 : пер. с яп. яз. – Кикай косаку. 1963. Т. 10. – № 55. – С. 42–49.

91. Карпов, А. Б. Исследование взаимодействия зерна и связки шлифовальных инструментов при динамических нагрузках : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1973. – 18 с.

92. Кожевников, Д. В. Металлорежущие инструменты / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 392 с.

93. Кольцов, В. П. Вибрационная обработка на станках импульсного действия : автореф. дис. … докт. техн. наук. – Иркутск, 1998. – 38 с.

94. 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

95. Коротков, А. Н. Повышение работоспособности лепестковых шлифовальных кругов : монография / А. Н. Коротков, Д. Б. Шатько ; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2005. – 184 с.

96. Коротков, А. Н. Повышение работоспособности отрезных шлифовальных кругов : монография / А. Н. Коротков, Г. М. Дубов ; ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2005. – 155 с.

97. Коротков, А. Н. Повышение эксплуатационных возможностей шлифовальных инструментов : монография / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2005. – 232 с.

98. Коротков, А. Н. Прибор для контроля прочности абразивных материалов // Научно-технические достижения. – 1989. – № 16. – С. 54–58.

99. 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

100. Коротков, А. Н. Установка для измерения прочности абразивных зёрен / А. Н. Коротков, В. Г. Баштанов // материалы межрег. науч.-практ. конф., 27–28 апр. 2001 г. – Бийск : Изд-во АлтГТУ, 2001, – С. 5–9.

101. Коротков, А. Н. Эксплуатационные свойства абразивных материалов : монография. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1992. – 122 с.

102. 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.

103. 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.

104. 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.

105. 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.

106. 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.

107. 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

108. 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.

109. 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.

110. 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.

111. 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 : Изд-во ГУ КузГТУ, 2010. – сб. № 3. – С. 72–75.

112. 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.

113. 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.

114. 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.

115. Коротков, В. А. Износ шлифовальных зёрен с разной формой // Обработка металлов. – 2007. – № 1. – С. 30–32.

116. 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.

117. 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.

118. 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.

119. 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.

120. 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.

121. Коротков, В. А. Исследование взаимосвязи формы и прочности ориентированных шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, В. Е. Фролов, Д. С. Кустов // Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса. Труды I Всерос. науч.-практ. конф., 24–25 окт. 2007 г. / ГУ КузГТУ. – Кемерово, 2007. – С. 219–224.

122. 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:000436682100011.

123. Коротков, В. А. Исследование геометрических и прочностных характеристик ориентированных шлифовальных зёрен различной формы / В. А. Коротков, Е. М. Минкин // Повышение 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.

124. 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.

125. 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.

126. 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.

127. 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.

128. 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.

129. Коротков, В. А. Исследование эксплуатационных показателей отрезных шлифовальных кругов с ориентированными шлифовальными зёрнами // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 4. – С. 61–65.

130. 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

131. 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.

132. 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.

133. 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.

134. Коротков, В. А. Оценка величин передних углов шлифовальных зёрен с учётом факторов их ориентации, формы и износа / В. А. Коротков, Е. М. Минкин, А. С. Полтораков // «Россия Молодая». Сборник докладов III Всерос., 56-й науч.-практ. конф., 11–15 апр. 2011 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2011. – С. 155–157.

135. 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.

136. 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.

137. Коротков, В. А. Оценка формы и площади поверхности шлифовальных зёрен в трехмерном пространстве // Обработка металлов. – 2007. – № 2. – С. 27–29.

138. 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.

139. Коротков, В. А. Отрезные шлифовальные круги из зёрен с контролируемой формой и ориентацией // Обработка металлов. – 2010. – № 1. – С. 29–30.

140. Коротков, В. А. Повышение безопасности эксплуатации отрезных шлифовальных кругов // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах. Матер. VIII междунар. науч.-практ. конф., 12 ноября 2009 г. – Кемерово : Изд-во ГУ КузГТУ, 2009. – Т. 1. – С. 117–119.

141. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов : монография. – Москва : Машиностроение, 2009. – 178 с.

142. 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.

143. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных показателей шлифовальных кругов путем упорядочения геометрии используемых абразивных зерен : монография. – Москва; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. – 230 с.

144. Коротков, В. А. Повышение эксплуатационных характеристик отрезных шлифовальных кругов // Главный механик. – 2009. – № 7. – С. 11–17.

145. 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

146. 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.

147. 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.

148. 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 Кузбасского государственного технического университета. – 2014. – № 2. – С. 61–67.

149. 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.

150. 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. 157–159.

151. 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.

152. 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 : Изд-во ГУ КузГТУ, 2011. – сб. № 4. – С. 36–39.

153. 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.

154. Коротков, В. А. Стенд для испытаний отрезных шлифовальных кругов на механическую прочность // Обработка металлов. – 2006. – № 2. – С. 10–11.

155. 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.

156. 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.

157. 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.

158. Коротков, В. А. Тепловые явления при шлифовании отрезными кругами с контролируемой формой абразивных зёрен // Обработка металлов. – 2007. – № 4, – С. 28–29.

159. 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.

160. 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

161. 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.

162. 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.

163. Коротков, В. А. Шлифовальные инструменты и процессы отрезного шлифования : учебное пособие с грифом УМО АМ. – Кемерово : Полиграфический цех КузГТУ, 2013. – 158 с.

164. Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. – Москва : Машиностроение, 1974. – 279 с.

165. Корчак, С. Н. Прогрессивные технологии и автоматизация круглого шлифования. – Москва : Машиностроение, 1968. – 108 с.

166. Костенков, С. А. Повышение работоспособности галтовочных тел на основе применения зёрен с контролируемой формой : дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2007. – 183 с.

167. Кремень, З. И. Виды шлифования и выбор характеристик абразивных кругов / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. В. Бабошкин. – Санкт-Петербург : Инструменты и технологии, 2002. – 54 с.

168. Кремень, З. И. Технологии шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. В. Бабошкин // под. общ. ред. З. И. Кремня. – Санкт-Петербург : Политехника, 2007. – 424 с.

169. Кудасов, Г. Ф. Абразивные материалы и инструменты. – Ленинград : Машиностроение, 1967. – 158 с.

170. Кудряшов, Б. П. Разработка абразивных кругов со специальной структурой для шлифования быстрорежущих сталей : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Москва. 1983. – 22 с.

171. Кузнецов, С. П. Шаржирование обработанной поверхности при шлифовании кругами из кубического нитрида бора: дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград, 2022. – 136 с.

172. Кулаков, Д. М. Предотвращение дефектов при шлифовании / Д. М. Кулаков, В. Д. Хрульков, И. В. Дунин–Барковский. – Москва : Машиностроение, 1975. –144 с.

173. Кунгуров, Д. А. Исследование геометрических параметров абразивных зерен в магнитно-абразивной обработке / Д. А. Кунгуров, А. Ф. Мкртчян // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 4. https://science-education.ru/article/view?id=14140

174. Курдюков, В. И. Исследование упругих и деформирующих свойств связок шлифовальных инструментов : дис. … канд. техн. наук. – Москва, 1976. – 216 с.

175. Курдюков, В. И. Научные основы проектирования абразивных инструментов : монография. – Курган : Изд-во Кург. гос. ун-та, 2005. – 159 с.

176. Курдюков, В. И. Научные основы проектирования, изготовления и эксплуатации абразивного инструмента : дисс. ... докт. техн. наук. – Курган, 2000. – 496 с.

177. Курдюков, В. И. Основы абразивной обработки : учебное пособие. – Курган : Курганский гос. ун-т, 2014. – 195 с.

178. Лоладзе, Т. Н. Износ алмазов и алмазных кругов / Т. Н. Лоладзе, Г. В. Бокучава. – Москва : Машиностроение, 1967. – 112 с.

179. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – Москва : Машиностроение, 1982. – 320 с.

180. Лурье, Г. Б. Абразивные инструменты и их эксплуатация. – Москва : Машиностроение, 1971. – 62 с.

181. Лурье, Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Ленинград : Машиностроение, 1984. – 103 с.

182. Любомудров, В. Н. Абразивные инструменты и их изготовление / В. Н. Любомудров, Н. Н. Васильев, Б. И. Фальковский. – Москва – Ленинград : МАШГИЗ, 1953. – 375 с.

183. Люкшин, В. С. Повышение работоспособности шлифовальных лент путём использования зёрен с контролируемой формой и ориентацией : дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2007. – 173 с.

184. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания. – Москва : Машиностроение, 1976. – 278 с.

185. Маслов, Е. Н. Основные направления в теории резания абразивным, алмазным и эльборовым инструментом / Е. Н. Маслов, Н. В. Постникова. – Москва : Машиностроение, 1975. – 48 с.

186. Маслов, Е. Н. Основы теории шлифования металлов. – Москва : МАШГИЗ, 1951. – 177 с.

187. Маслов, Е. Н. Теория шлифования металлов. – Москва : Машиностроение, 1974. – 319 с.

188. Мгеладзе, В. Ф. Разработка методов исследования некоторых механических свойств абразивных материалов в зерне : автореф. дис. … канд. техн. наук. – Ленинград, 1970. – 16 с.

189. Механические свойства абразивных зёрен / Х. Есикава // ВЦП – № Ц-48565 : пер. с яп. яз. – Кикай то когу, 1964. Т. 8, – С. 40–46.

190. Милов, В. А. Устройства для контроля прочности. – Москва : Машиностроение, 1976. – 126 с.

191. Мишнаевский, Л. Л. Износ шлифовальных кругов. – Киев : Наукова думка, 1982. – 191 с.

192. Мурдасов, А. В. Исследование процесса обдирочного шлифования проката : дис. … канд. техн. наук. – Ленинград-Челябинск, 1967. – 195 с.

193. Некрасов, Ю. И. Лазерная нанометрия деформирования режущего инструмента. – Тюмень : Изд-во ТюмГНТУ, 2008. – 156 с.

194. Нетребко, В. П. Прочность шлифовальных кругов / В. П. Нетребко, А. Н. Коротков. – Москва : Агентство Российской печати, 1992. – 104 с.

195. Новицкий, Н. В. Оценка погрешностей результатов измерений / Н. В. Новицкий, И. Д. Зограф. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.

196. Новоселов, Ю. К. Анализ и моделирование пространственно-временного взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при шлифовании с целью повышения эффективности чистовых и отделочных операций : дис. … докт. техн. наук. : – Барнаул, 1980. – 402 с.

197. Новоселов, Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.

198. Новосёлов, Ю. К. Исследование процесса шлифования с получением высоких классов чистоты поверхности. (Применительно к валкам холодной прокатки): автореф. дис. … канд. техн. наук. – Пермь, 1969. – 16 с.

199. Новоселов, Ю. К. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании / Ю. К. Новоселов, Е. Ю. Татаркин ; под ред. А. В. Королева. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1988. – 126 с.

200. Носенко, В. А. Исследование изнашивания абразивных материалов в зависимости от условий взаимодействия их с титановыми сплавами при шлифовании : дисс. ... канд. техн. наук. – Волжский, 1979. – 236 с.

201. Носенко, В. А. Научные основы шлифования адгезионно-активных d-переходных металлов : дисс. … докт. техн. наук. – Саратов, 2000. – 389 с.

202. Носенко, В. А. Технология шлифования металлов : монография / В. А. Носенко, С. В. Носенко. – 3-е изд., стер. – Старый Оскол : ТНТ, 2020. – 615 с.

203. Носенко, С. В. Этапы глубинного шлифования : монография / С. В. Носенко, В. А. Носенко, С. А. Зотова. – Волгоград : ВолгГТУ, 2021. – 165 с.

204. Оборудование и оснастка предприятий абразивной и алмазной промышленности / под ред. В. А. Рыбакова. – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 271 с.

205. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. В. Н. Бакуля. – Москва : Машиностроение, 1975. – 296 с.

206. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. А. М. Ковальчука. – Москва : Машиностроение, 1984. – 288 с.

207. Пат. 22488513 РФ, МПК^{7} B 07B 1/40, 13/007/08. Вибрационный сепаратор / А. Н. Коротков, Г. М. Дубов, В. Г. Баштанов. – № 2003129945 ; заявл. 08.10.03 ; опубл. 27.03.05, Бюл. № 9.

208. Пат. 2221632 РФ, МПК^{7} B 01F 9/12, B 28C 5/32. Смесительная установка для приготовления абразивных масс / А. Н. Коротков, Д. Б. Шатько. – № 2002132579 ; заявл. 04.12.02 ; опубл. 20.01.04, Бюл. № 2.

209. Пат. 2369474 РФ, МПК^{7} B 24D 18/00. Способ изготовления шлифовальных инструментов с ориентированными зёрнами / В. А. Коротков. – № 2008105086 ; заявл. 11.02.08 ; опубл. 10.10.09. Бюл. № 28.

210. Пат. 2349446 РФ, МПК^{7} B 24D 18/00. Способ изготовления шлифовальных кругов повышенной прочности на бакелитовой связке / В. А. Коротков. – № 2007129252 ; заявл. 30.07.07 ; опубл. 20.03.2009, Бюл. № 8.

211. Пат. 2292032 РФ, МПК^{7} 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.

212. Пат. на ПМ 38505 РФ, МПК^{7} G 01N 3/00. Устройство для определения ударной прочности шлифовальных зёрен / А. Н. Коротков, А. М. Романенко, В. С. Люкшин, М. А. Минешев. – № 2004104702 ; заявл. 17.02.05 ; опубл. 20.06.05, Бюл. № 17.

213. Пат. 2236303 РФ, МПК^{7} B 03C 7/08. Устройство для сепарации шлифовальных зёрен по форме / А. Н. Коротков, А. С. Костенков, В. С. Люкшин, Н. В. Прокаев. – № 2003113373 ; заявл. 27.12.07 ; опубл. 20.09.04, Бюл. № 26.

214. Пеньков, Л. А. Обработка инструментами из шлифовальной шкурки / Л. А. Пеньков, Н. В. Костин. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 235 с.

215. Петрушин, С. И. Введение в теорию несвободного резания материалов. – Томск : Изд-во ТПУ, 1999. – 97 с.

216. Петрушин, С. И. Оптимальное проектирование формы режущей части лезвийных инструментов / С. И. Петрушин, И. М. Бобрович, М. А. Корчуганова. – Томск : Изд-во ТПУ, 1999. – 91 с.

217. Петрушин, С. И. Основы формообразования резанием лезвийными инструментами. – Томск : Изд-во НТЛ, 2004. – 204 с.

218. Петрушин, С. И. Повышение эксплуатационных возможностей отрезных шлифовальных кругов / С. И. Петрушин, В. А. Коротков // Обработка металлов. – 2005. – № 4. – С. 16–18.

219. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. – Москва : Высшая школа, 1974. – 587 с.

220. Полетика, М. Ф. Теория резания металлов. – Томск : Изд-во ТПИ, 1986. – 94 с.

221. Полетика, М. Ф. Теория резания. Часть I. Механика процесса резания : Учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2001. – 202 с.

222. Полтавец, В. В. Теоретическое обоснование режимных параметров шлифования труднообрабатываемых сталей и сплавов на основе их оптимизации с учётом нестационарности процесса : автореф. дис. … докт. техн. наук. – Донецк, 2020. – 36 с.

223. Полянчиков, Ю. Н. Научные основы создания и применения однокомпонентного абразивного инструмента, формируемого импульсным прессованием и высокотемпературным спеканием : дисс. … докт. техн. наук. – Саратов, 2002. – 336 с.

224. Попов, С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – Москва : Машиностроение, 1977. – 263 с.

225. Попов, С. А. Заточка и доводка режущего инструмента. – Москва : Высшая школа, 1986. – 224 с.

226. Попов, С. А. Шлифование высокоскоростными кругами / С. А. Попов, Р. В. Ананьян. – Москва : Машиностроение, 1980. – 80 с.

227. Попов, С. А. Шлифовальные работы. – Москва : Высшая школа, 1987. – 384 с.

228. Прочность шлифовальных кругов / С. Окада // ВЦП – № Ц-58020 : пер. с яп. яз. – Сэрамиккусу, 1973. Т. 8. – № 10. – С. 824–832.

229. Пушкарев О. И. Методы и средства контроля физико-механических характеристик абразивных материалов / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер. – Волгоград : Волжский институт строительства и технологий, 2004. – 142 с.

230. Пушкарев, О. И. Прибор и методика технологического контроля качества прочностных характеристик шлифовальных зерен / О. И. Пушкарев, В. М. Шумячер // Вестник СГТУ. – 2005. – №2 (7). – С. 26–31.

231. Разрушение шлифовальных кругов от центробежных сил при высоких скоростях вращения и методы их упрочнения / И. Судзуки // ВЦП – № Ц-26242 : пер. с яп. яз. – Кикай гидзюцу, 1973. Т. 21. – № 4. – С. 62–68.

232. Резников, А. Н. Теплофизика резания. – Москва : Машиностроение, 1969. – 288 с.

233. Сагарда, А. А. Алмазно-абразивная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Киев: Техника, 1974. – 180 с.

234. Сальников, А. Н. Системный анализ процессов абразивной обработки (на примере шлифования) : дис. … докт. техн. наук. – Саратов, 1982. – 428 с.

235. Саютин, Г. И. Исследование качества шлифованной поверхности жаропрочного сплава в зависимости от характеристики и затупления шлифовального круга : дисс. ... канд. техн. наук. – Киев, 1967. – 209 с.

236. Саютин, Г. И. Физико-химические основы процесса шлифования титановых сплавов : дисс. ... докт. техн. наук. – Волжский, 1982. – 378 с.

237. 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.

238. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008614244. Геометрия шлифовальных зерен / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2008613245 ; заявл. 14.07.2008 ; зарег. 05.09.2008.

239. Свидетельство о государственной регистрации 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.

240. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008610817. Износ шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2007615417 ; заявл. 27.12.2007 ; зарег. 16.02.2008.

241. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011615114. Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2011613167 ; заявл. 04.05.11 ; зарег. 29.07.11.

242. 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.

243. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011614263. Угол наклона шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Е. М. Минкин. – № 2011612443 ; заявл. 08.04.11 ; зарег. 30.05.11.

244. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2003611938. Определение геометрических характеристик шлифовальных зёрен (Zerno) / А. Н. Коротков, Д. С. Захаров. – № 2003611454 ; заявл. 02.07.03 ; зарег. 22.08.03.

245. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2007612468. Площадь поверхности и форма шлифовальных зёрен / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2007611718 ; заявл. 02.05.07; зарег. 13.06.07.

246. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610153. Форма шлифовальных зёрен / А. Н. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2005612738 ; заявл. 25.10.05 ; зарег. 10.01.06.

247. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006613051. Форма шлифовальных зёрен в объёме / В. А. Коротков, Г. М. Рылов. – № 2006612327 ; заявл. 04.07.06 ; зарег. 01.09.06.

248. Сидорина, А. И., Углеродные ткани для изделий авиационной техники / А. И. Сидорина, А. М. Сафронов, К. Е. Куцевич, О. Н. Клименко // Труды ВИАМ. – 2020. – № 12 (94). – С. 47–58. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58

249. Силин, С. С. Метод подобия при резании металлов. – Москва : Машиностроение, 1979. – 152 с.

250. Сипайлов, В. А., Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности. – Москва : Машиностроение, 1978. – 167 с.

251. Скворчевский, Н. Я. Эффективность магнитно-абразивной обработки / Н. Я. Скворчевский, Э. Н. Федорович, П. И. Ящерицын. – Минск : Навука і тэхніка, 1991. – 214 с.

252. Справочник инструментальщика / под. общ. ред. И. А. Ординарцева. – Ленинград : Машиностроение. 1987. – 846 с.

253. Справочник конструктора-инструментальщика / под. общ. ред. В. И. Баранчикова. – Москва : Машиностроение. 1994. – 560 с.

254. Старков, В. К. Высокоструктурный инструмент для повышения эффективности процессов шлифования / В. К. Старков, Ж. В. Вараткова. – Москва : Ким Л. А., 2019. – 382 с.

255. Старков, В. К. Шлифование высокопористыми кругами. – Москва : Машиностроение, 2007. – 688 с.

256. Тененбаум, М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – Москва : Машиностроение, 1966. – 331 с.

257. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов. – Москва : ГИФМЛ, 1963. – 539 с.

258. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование. – Ленинград : Машиностроение, 1979. – 247 с.

259. Филимонов, Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов. – Ленинград : Машиностроение, 1973. – 134 с.

260. Хрущев, М. Н. Абразивное изнашивание / М. Н. Хрущев, М. А. Бабичев. – Москва : Наука, 1970. – 250 с.

261. Худобин, Л. В. Исследование процесса шлифования с целью повышения его эффективности : дисс. ... докт. техн. наук. – Ульяновск, 1968. – 391 с.

262. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 298 с.

263. Худобин, Л. В. Пути совершенствования технологии шлифования. – Саратов : Приволжское кн. изд-во, 1969. – 213 с.

264. Худобин, Л. В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. – Москва : Машиностроение, 1971. – 214 с.

265. Худобин, Л. В. Шлифование заготовок из коррозионностойких сталей с применением СОЖ / Л. В. Худобин, М. А. Белов. – Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1989. – 146 с.

266. Худобин, Л. В. Шлифование заготовок клиновидных изделий / Л. В. Худобин, А. Ш. Хусаинов ; под общ. ред. Л. В. Худобина. – Ульяновск : УлГТУ, 2007. – 249 с.

267. Худобин, Л. В. Шлифование композиционными кругами / Л. В. Худобин, Н. И. Веткасов. – Ульяновск : УлГТУ, 2004. – 256 с.

268. Цехин, А. А. Повышение эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов на бакелитовой связке путём использования классифицированного по форме зерна : дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2001. – 148 с.

269. Черепанов, Г. П. Механика хрупкого разрушения. – Москва : Наука, 1974. – 640 с.

270. Чурин, Ю. Г. Теория сепарации сыпучих материалов и ее применение при проектировании и эксплуатации промышленных сепараторов вибрационного типа : монография. – Кострома : КГСХА, 2010. – 98 с.

271. Шальпов, В. А. Шлифование и полирование высокопрочных материалов. – Москва : Машиностроение, 1972. – 272 с.

272. Шатько, Д. Б. Повышение эффективности использования лепестковых шлифовальных кругов за счёт зёрен с контролируемой формой: дис. … канд. техн. наук. – Кемерово, 2005. – 202 с.

273. Шеркунов, Б. Ф. Исследование процесса высокоскоростного шлифования кругами на керамической связке : дисс. ... канд. техн. наук. – Томск, 1975. – 221 с.

274. Широков, А. В. Исследование топограмм шлифовальных кругов различных характеристик / А. В. Широков, А. П. Осипов, Р. Н. Мансуров // Известия высших учебных заведений. – 2011. – № 10. – С. 76–80.

275. Шоу, М. Выбор отрезных абразивных кругов // Конструирование и технология машиностроения : труды американского общества инженеров механиков. – 1975. – № 1. – Т. 97. – С. 139–147.

276. Шумячер, В. М. Абразивные материалы, инструменты, пасты, суспензии и их использование. Учебно-терминологический словарь / В. М. Шумячер, С. А. Крюков, Н. В. Байдакова, А. М. Безнебеева, Е. М. Ревзина. – Санкт-Петербург : Наукоемкие технологии, 2019. – 153 с.

277. Шумячер, В. М. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на процесс абразивного диспергирования металла брусками : дисс. ... канд. техн. наук. – Волжский, 1980. – 180 с.

278. Шумячер, В. М. Механо-химические процессы и эффективность смазочно-охлаждающих технологических сред при суперфинишировании, хонинговании и доводке : дисс. ... докт. техн. наук. – Саратов, 1997. – 265 с.

279. Шумячер, В. М. Повышение надежности и эффективности рельсошлифовальных инструментов на бакелитовой связке. Теория шлифования. Физико-химические основы. : монография / В. М. Шумячер, С. А. Крюков, И. Ю. Орлов. – Волгоград : ВолгГТУ, 2021. – 160 с.

280. Якимов, А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. – Москва : Машиностроение, 1984. – 311 с.

281. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования. – Москва : Машиностроение, 1975. – 176 с.

282. Якимов, А. В. Прерывистое шлифование. – Киев ; Одесса : Вища школа, 1986. – 174 с.

283. Якимов, А. В. Технологические основы процесса шлифования кругами с прерывистой рабочей поверхностью : автореф. дисс. … докт. техн. наук. – Москва, 1970. – 42 с.

284. Янюшкин, А. С. Контактные процессы при электроалмазном шлифовании / А. С. Янюшкин, В. С. Шоркин. – Москва : Машиностроение – 1, 2004. – 230 с.

285. Янюшкин, А. С. Технология комбинированного электроалмазного затачивания твердосплавных инструментов. – Москва : Машиностроение – 1, 2003. – 242 с.

286. Янюшкин, А. С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы её реализации : монография / А. С. Янюшкин. – Старый Оскол : ТНТ, 2020. – 335 с.

287. Ящерицын, П. И. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын, М. Т. Забавский, Л. М Кожуро, Л. М. Акулович. – Минск : Наука и техника, 1988. – 272 с.

288. Ящерицын, П. И. Образование рабочих кромок упрочняющим шлифованием / П. И. Ящерицын, В. Д. Ефремов. – Минск : БелНИИНТИ, 1989. – 61 с.

289. Ящерицын, П. И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств алмазно-абразивного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск : Наука и техника, 1972. – 478 с.

290. Ящерицын, П. И. Прогрессивные технологии финишной обработки деталей / П. И. Ящерицын, С. А. Попов, М. С. Ноерман. – Минск : Беларусь, 1978. – 176 с.

291. Ящерицын, П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов : монография / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. – 2-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол : ТНТ, 2015. – 447 с.

292. Ящерицын, П. И. Финишная обработка деталей уплотненным потоком свободного абразива / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов, А. Д. Гридин. – Минск : Наука и техника, 1978. – 224 с.

293. Ящерицын, П. И. Шлифование металлов / П. И. Ящерицын, Е. А. Жалнерович. – Минск : Беларусь, 1970. – 463 с.

294. Denger, W. Spanende Formung / W. Denger, H. Lutze, E. Smejkal. – Berlin : VEB Verlag Technik, 1968. – 330 S.

295. Drössler, H. Ein Beitrag zur Schaffung von Grundlagen zur Steuerung des Abrichtvorganges an Schleifmaschinen : Dis…Dipl. – Jng. – Chemnitz, 1971. – 114 S.

296. Handbuch der Metallbearbeitung. – Haar – Gruiten : Verlag Europa – Lehrmittel, 2002. – 607 S.

297. Hirsch, A. Werkzeugmaschinen: Grundlagen, Auslegung, Ausfuehrungsbeispiele. Auflage 2 – Wiesbaden : Springer Vieweg, 2012. – 439 S.

298. 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

299. 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

300. 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, ICMTMTE: MATEC Web of Conferences (2018) Volume 224, October 30, 2018, P. 1–5. DOI:10.1051/matecconf/201822401071, WOS:000476933600071.

301. 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

302. 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

303. 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, P. 1–8. DOI:10.1088/1757-899X/91/1/012041, WOS:000361836000041

304. 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

305. Korotkov, V. A. Research of operational characterizations of cutting discs with oriented abrasive grains // Applied Mechanics and Materials : Trans Tech Publications, Switzerland, 2014, Vol. 682(2014) P. 224–230. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.682.224, INSPEC:15298656

306. 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, 2007. – Tomsk, Russia, 2007, P. 49–51.

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

308. 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, postgraduates and young scientists, April 7–11, 2003. – Tomsk, Russia, 2003, P. 102–103. DOI:10.1109/SPCMTT.2003.1438150, INSPEC:8486128

309. Leonesio M., A Time-Domain Surface Grinding Model for Dynamic Simulation / M. Leonesio, P. Parenti, A. Cassinari, G. Bianchi, M. Monn // Procedia CIRP 4. – 2012. – P. 166 – 171. DOI:10.1016/j.procir.2012.10.030

310. Malkin, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives / S. Malkin, C. Guo // Industrial Press, New York, USA. – 2008. – 372 P.

311. Opitz, H. Untersuchug der Eigenschaften von Schleifkörpern und ihr Verhalten im Schleifvorgang / H. Opitz, J. Peklenik, K. Brückner. – Köln und Opladen : Westdeutscher Verlag, 1964. – 63 S.

312. Opitz, H. Untersuchug der Härte von Schleifkörpern / H. Opitz, J. Peklenik, W. Ernst. – Köln und Opladen : Westdeutscher Verlag, 1964. – 57 S.

313. Shaw, M.C. Principles of Abrasive Processes. Clarendon Press, Oxford University Press, Oxford, UK, – 1996. – 574 P.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение 1

Инжиниринговая компания
СПЕЦКОМПЛЕКТАЦИЯ

Официальный представитель:
ЗАО ДЗХО «Заря», г. Дзержинск, www.dzho.ru
ОАО «Боровлянский завод Лесхозмаш», www.leskhozmash.ru
ЗАО ПК «Эдвенс», www.edvens.ru
ООО «Смелт», www.smelt.su

ООО ИК «Спецкомплектация»
650000, г. Кемерово
ул. 40 лет Октября д.2
т/ф (384) 267-2697, 262-6421
www.sp-kom.ru
asv-gold@yandex.ru

ИНН 4205140486,
КПП 420501001
ОГРН 1074205020867
ОКПО 82734921

20.06.2014 г.

Акт

испытания и внедрения

Способ ротационно-абразивной отрезки (авторы: к.т.н, доц. Коротков В.А., магистрант Дурсенев А.А.) был опробован для разрезки валов большого диаметра в условиях ООО ИК «Спецкомплектация». Для реализации способа использован токарный станок модели 1М63 с установленной на резцедержателе угловой шлифовальной машиной с наружным диаметром отрезных кругов 230 мм. Отрезка производилась путём поперечной подачи отрезного круга с одновременным вращением заготовки, закреплённой в патроне станка. Производилась разрезка заготовок с наружным диаметром 130 мм из сталей ст3, 09Г2С, сталь 20. Разрезка производилась при частоте вращения шпинделя токарного станка 80 об/мин и поперечной подаче отрезного круга 0,058 мм/об. Способ ротационно-абразивной отрезки доказал свою функциональную пригодность. Торцевая поверхность отрезанных заготовок чистая, с металлическим блеском, без прижогов и следов пластической деформации.

Способ ротационно-абразивной отрезки позволяет производить разрезку заготовок большого диаметра в условиях мелкосерийного производства при отсутствии специализированного отрезного оборудования.

По результатам испытаний способ ротационно-абразивной отрезки внедрён в производство на ООО ИК «Спецкомплектация».

Генеральный директор С.В. Архипов

Приложение 2

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ВостокПолимерХим»

Восток Полимер Хим

Россия, 650001, г. Кемерово, ул. Севастопольская 1, e-mail: vostokpolimerhim@gmail.com
ИНН/КПП 4205242086/420501001 ОКПО – 37714674, ОКВЭД – 24.16;
ОГРН-1124205006430 р/с 40702810532450002212 филиал ОАО "Уралсиб" в г. Новосибирск
к/с 30101810400000000725, БИК 045004725

Директор
ООО «ВостокПолимерХим»
_____ Лугин В.П.
«27» февраля 2014 г.

Акт
испытания и внедрения
результатов научно-исследовательской работы
докторанта кафедры «ТАМП» НИТПУ
к.т.н., доц. Короткова В.А.

Комиссия ООО «ВостокПолимерХим» в составе главного инженера Тумайкина А.А., механика Коншина И.М. и докторанта кафедры «ТАМП» НИТПУ составила настоящий акт о том, что в период с 03.02.2014 г. по 27.02.2014 г. были проведены производственные испытания опытных отрезных шлифовальных кругов из зёрен с контролируемой формой и ориентацией. Кроме того, было испытано устройство для оценки разрывной прочности отрезных кругов в статических условиях, разработанное на основе патента на изобретение РФ №2292032 «Способ испытания шлифовальных кругов на механическую прочность».

Испытания отрезных кругов проводились на операции отрезки труб из стали 20 с размерами: 32,0x3,5; 57,0x3,0; 89,0x5,0 с помощью ручной угловой шлифовальной машинки и маятникового отрезного станка. Испытанию были подвергнуты опытные круги с различными коэффициентами формы зёрен, круги с контролируемой формой зёрен вблизи посадочного отверстия и круги с радиальным и тангенциальным расположением зёрен. В качестве сравнительного эталона испытывались также обычные отрезные круги, отличающиеся от опытных кругов неупорядоченностью формы и ориентации зёрен и изготовленные с ними за один технологический цикл.

В результате производственных испытаний установлено, что:

1. Круги из зёрен с изометрической формой (с малыми значениями коэффициентов формы) имеют на 30-35% пониженный износ по сравнению со стандартными кругами;

2. Круги из игольчато-пластинчатых зёрен (с большими величинами коэффициентов формы) имеют на 15-18% более высокую режущую способность, чем стандартные инструменты;

Продолжение прил. 2

3. Круги из зёрен с контролируемой формой вблизи посадочного отверстия режут металл на 25-27% производительнее, чем обычные инструменты;

4. Круги из зёрен с радиальной ориентацией режут металл на 14-17% интенсивнее, чем стандартные круги;

5. Круги из зёрен с тангенциальной ориентацией обладают на 22-25% более высокой стойкостью.

Установлено также, что способ и устройство для контроля прочности отрезных кругов в статических условиях позволяют оперативно, безопасно и на базе доступного и распространённого прессового оборудования проводить тестирование шлифовальных кругов на предмет соответствия допустимой рабочей скорости и, как следствие, соответствия требованиям безопасности при работе.

Заключение.

На основании полученных результатов комиссия считает возможным признать, что экспериментальные отрезные круги с контролируемой формой и ориентацией зёрен превосходят стандартные круги по ряду эксплуатационных показателей. Поэтому такие отрезные шлифовальные круги следует внедрять на ООО «ВостокПолимерХим».

К промышленному использованию и внедрению целесообразно рекомендовать также способ и устройство для контроля прочности шлифовальных кругов в статических условиях.

Главный инженер Тумайкин А.А.

Механик Коншин И.М.

Докторант НИТПУ Коротков В.А.

Приложение 3

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ «ЗЭТА»

650099, Россия, г. Кемерово, ул. Карболитовская, 1
ИНН 4205020968, р/с 40702810100070003716, филиал № 4207 ЗАОВТБ 24 г. Кемерово,
БИК 043207739, к/с 30101810400000000739, КПП 420501001,ОКПО 57616784

Телефон (3842) 32-50-75
Факс (3842) 32-52-15
Web: www.zeta.kem.ru
E-Mail: avtozeta@kem.ru

УТВЕРЖДАЮ
директор по развитию ООО «ЗЭТА»
Шматченко А.И.
«28» 04 2008 г.

Акт

производственных испытаний и внедрения результатов научных разработок
аспиранта Томского политехнического университета
Короткова Виталия Александровича

На заготовительном участке ООО «ЗЭТА» на операции предварительной разрезки заготовок из легированных сталей марок Х, 9Х1, ШХ15 были проведены сравнительные испытания экспериментальных отрезных шлифовальных кругов, разработанных и изготовленных асп. Коротковым В.А. по результатам его научных исследований. Отличительной особенностью данных кругов являлось наличие в их составе зерен с определенной формой или зерен с определенной ориентацией в теле инструментов. Сравнение велось по отношению к стандартным кругам с аналогичной характеристикой, состоящих из обычных зерен с произвольной формой и неконтролируемой ориентацией. При испытаниях соблюдались одинаковые условия их проведения (форма и размер сечения разрезаемых заготовок, скорость отрезки и усилие прижатия инструментов к заготовке). Испытания проводились на абразивно-отрезном станке маятникового типа. В ходе испытаний фиксировались:

- режущая способность кругов (по времени, необходимом для отрезки 25 одинаковых заготовок);
- износ кругов (по уменьшению их диаметров после отрезки 25 одинаковых заготовок);
- наличие и интенсивность цветов побежалости на отрезанных заготовках.

Кроме сравнительной оценки работоспособности экспериментальных отрезных кругов было испытано также и нашло практическое применение

Продолжение прил. 3

устройство по контролю разрывной прочности шлифовальных кругов различных типов, разработанных аспирантом Коротковым В.А. Оно позволяет выявить возможные дефекты в шлифовальных кругах и устанавливать наличие соответствия рабочей скорости, указанной в характеристике круга, ее фактической величине.

Выводы по итогам испытаний:

1. Время отрезки 25 заготовок кругами с характеристикой 230х3х32 13А63Н[$К_ф$] СТ3 Б50 м/с из игольчато-пластинчатых зерен на 15-20% меньше, чем стандартными кругами. Износ кругов с данной характеристикой из изометрических зерен на 25-30% меньше, чем стандартных инструментов. При этом менее выраженные цвета побежалости наблюдаются на заготовках после отрезки кругами, состоящими из игольчато-пластинчатых зерен.
2. Шлифовальными кругами с характеристикой 230х3х22 13А63Н/53С32Н [$К_ф$] Т2 БУ 90 м/с удается в 1,2-1,23 раза быстрее отрезать одинаковое количество заготовок, чем стандартными кругами. Причем, износ данных кругов находится на уровне или несколько ниже, чем у стандартных кругов, а цвета побежалости на заготовках после отрезки ими имеют меньшую зону распространения.
3. Для отрезки одинакового числа заготовок отрезным кругом 230х4х32 13А 40Н [Θ] Т2 БУ 80 м/с с радиальной ориентацией зерен требуется в 1,3-1,7 раза меньше времени, чем при использовании стандартного круга. Аналогичный круг с тангенциальной ориентацией зерен изнашивается на 22-24% меньше, чем стандартный круг при отрезке одинакового числа заготовок. При этом меньшая зона термического влияния наблюдается на заготовках, отрезанных кругами с радиальной ориентацией зерен.
4. Устройство для контроля разрывной прочности шлифовальных кругов, основанное на нагружении их посадочных отверстий распределенной нагрузкой в статических условиях, без их вращения позволяет производить экспресс-проверку и отбраковку шлифовальных кругов с дефектами или заниженной фактической рабочей скоростью. Оно имеет простую конструкцию, может быть легко воспроизведено и модернизировано. Может работать в комплекте с любым прессовым оборудованием, просто в эксплуатации и обслуживании.

Заключение

Проведенные испытания показали, что отрезные шлифовальные круги, разработанные асп. Коротковым В.А., имеют более высокие эксплуатационные показатели, чем стандартные инструменты. Их следует применять дифференцировано, в зависимости от приоритетных критериев обработки: когда требуется высокая производительность обработки – следует применять круги из игольчато-пластинчатых или радиально ориентированных зерен, а когда упор делается на высокую стойкость и малый расход инструмента, то необ-

Продолжение прил. 3

ходимо применять круги из изометрических или тангенциально ориентированных зерен.

Упрочнение отрезных кругов путем использования зерен с контролируемой формой позволяет повысить их рабочую скорость и, тем самым, улучшает их эксплуатационные возможности.

Устройство для контроля разрывной прочности шлифовальных кругов позволяет быстро, эффективно и травмобезопасно контролировать наличие дефектов и несоответствий у имеющихся на предприятии шлифовальных инструментов.

Таким образом, экспериментальные шлифовальные круги и устройство для контроля их разрывной прочности по совокупности положительных свойств следует рекомендовать к внедрению на ООО «ЗЭТА».

Начальник технического отдела — Шевгенина С.А.

Начальник технологического бюро — Левашова Л.А.

Аспирант — Коротков В.А.

Приложение 4

• SCHLEIFSCHEIBENFABRIK ROTTLUFF GMBH · Postfach 90 01 36 • 09037 Chemnitz

ROTTLUFF®
SCHLEIFSCHEIBENFABRIK

Trennscheiben
Cutting Discs
Meules à tronçonner
Schruppscheiben
DPC Discs
Meules à ébarber
Lamellen-Schleifscheiben
Flap Type Discs
Disque à lamelles
Diamantscheiben
Diamond Blades
Meules diamantées

Chemnitz, den 30.08.2002

Bestätigung

Hiermit bestätigen wir, daß Herr Vitali Korotkow, geb. am 5.2. 1983 in Kemerowo, in unserem Unternehmen in der Zeit vom 7.8.2002 bis 30.8.2002 ein Praktikum absolviert hat. Die Arbeitszeit betrug 144 Stunden (18 Tage a 8 h).
Folgende Tätigkeiten wurden durchgeführt:

1. Entstapelung von Trenn- und Schruppscheiben
2. Entstapelung von dünnwandigen Trennscheiben
3. Schleiftest an Trennscheiben mittels Handwinkelschleifer
4. Schleiftest an Schruppscheiben
5. Trenntest an Schienentrennscheiben

Alle Arbeiten wurden fachgerecht in ordentlicher Qualität ausgeführt.

Ruß
Geschäftsleitung

Schleifscheibenfabrik
"Rottluff" GmbH
Weideweg 17
D-09116 Chemnitz

i.V. Kunze

Fritzlar
Technologie und QS

SCHLEIFSCHEIBENFABRIK ROTTLUFF GMBH
Weideweg 17 · D-09116 Chemnitz
Phone: +49 (0) 3 71 3 69 95-0
Fax: +49 (0) 3 71 3 69 95-30
+49 (0) 3 71 30 43 40

Dresdner Bank Chemnitz
BLZ: 870 800 00
Konto-Nr.: 600 433 700
IBAN: DE03 8708 0000 0600 4337 00
S.W.I.F.T-Code: DRES DE FF 870

Deutsche Bank Chemnitz
BLZ: 870 700 00
Konto-Nr.: 140 601 600

Handelsregister: Amtsgericht Chemnitz
HRB-Nr.: 59 89
Geschäftsführer: Günter Ruß
Ust-Id-Nr.: /VAT-Id-No.: /TVA-Id-No.: /BTW-Id-No.: DE 140 855 445
e-mail: info@rottluff.de http://www.rottluff.de

TÜV ISO 9001

Приложение 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2006613051

Форма шлифовальных зёрен в объёме

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU), Рылов Григорий Михайлович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович, Рылов Григорий Михайлович (RU)***

Заявка № **2006612327**

Дата поступления **4 июля 2006 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

1 сентября 2006 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

об официальной регистрации программы для ЭВМ

№ 2007612468

«Площадь поверхности и форма шлифовальных зёрен»

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU), Рылов Григорий Михайлович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович, Рылов Григорий Михайлович (RU)***

Заявка № **2007611718**

Дата поступления **2 мая 2007 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

13 июня 2007 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2008614244

«Геометрия шлифовальных зёрен»

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU),***
Рылов Григорий Михайлович (RU)

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович,***
Рылов Григорий Михайлович (RU)

Заявка № **2008613245**
Дата поступления **14 июля 2008 г.**
Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ
5 сентября 2008 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011614263

«Угол наклона шлифовальных зёрен»

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович, Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Заявка № **2011612443**

Дата поступления **8 апреля 2011 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

30 мая 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011615114

«Передние углы ориентированных шлифовальных зёрен»

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович, Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Заявка № **2011613167**

Дата поступления **4 мая 2011 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

29 июня 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2011616506

«Геометрические модели шлифовальных зёрен»

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович, Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Заявка № **2011614679**

Дата поступления **27 июня 2011 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

19 августа 2011 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015619877

«Графическое построение геометрических моделей шлифовальных зёрен»

Правообладатели: ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Авторы: ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Заявка № **2015616594**
Дата поступления **16 июля 2015 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***15 сентября 2015 г.***

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2008610817

«Износ шлифовальных зёрен»

Правообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU), Рылов Григорий Михайлович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович, Рылов Григорий Михайлович (RU)***

Заявка № **2007615417**

Дата поступления **27 декабря 2007 г.**

Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ

15 февраля 2008 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2369474

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ С ОРИЕНТИРОВАННЫМИ ЗЕРНАМИ

Патентообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович (RU)***

Заявка № **2008105086**

Приоритет изобретения **11 февраля 2008 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***10 октября 2009 г.***

Срок действия патента истекает **11 февраля 2028 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017663831

«Углы наклона зёрен в шлифовальных инструментах»

Правообладатели: ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Авторы: ***Коротков Виталий Александрович (RU), Минкин Евгений Михайлович (RU)***

Заявка № **2017617836**
Дата поступления **21 июля 2017 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***12 декабря 2017 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2349446

СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ ПОВЫШЕННОЙ ПРОЧНОСТИ НА БАКЕЛИТОВОЙ СВЯЗКЕ

Патентообладатель(ли): ***Коротков Виталий Александрович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Виталий Александрович (RU)***

Заявка № **2007129252**

Приоритет изобретения **30 июля 2007 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***20 марта 2009 г.***

Срок действия патента истекает **30 июля 2027 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

Продолжение прил. 5

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2292032

СПОСОБ ИСПЫТАНИЯ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ НА МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ

Патентообладатель(ли): ***Коротков Александр Николаевич (RU), Коротков Виталий Александрович (RU)***

Автор(ы): ***Коротков Александр Николаевич (RU), Коротков Виталий Александрович (RU)***

Заявка № **2005112954**

Приоритет изобретения **28 апреля 2005 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации ***20 января 2007 г.***

Срок действия патента истекает **28 апреля 2025 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов